



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**OPTIMALIZACE MĚŘENÍ OPTICKÉHO VLÁKNA NA
VÝSTUPU VLÁKNOVÉHO SENZORU TEPLoty**

OPTICAL FIBER OUTPUT POWER TEMPERATURE SENSOR MEASURING OPTIMIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aneta Kolářková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Studentka: Aneta Koláčková

ID: 173677

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace měření optického vlákna na výstupu vláknového senzoru teploty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem bakalářské práce je analýza způsobu měření optického výkonu s důrazem na známé metody měření výkonu polarizovaného světla šířícího se optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami. Práce se zabývá možnostmi měření optického výkonu pro každou rovinu šíření zvlášť. Součástí práce je návrh měřícího pracoviště a jeho realizace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] COLLETT, E. Field Guide to Polarization, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN: 9780819458681

[2] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

[3] COLLETT, E. Polarized Light in fiber optics, SPIE, New Jersey 2003, ISBN: 9780819457615

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Konzultant: Ing. Martin Kyselák, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření optického výkonu na výstupu jednořivového optického vlákna, použitého jako senzor teploty, za pomoci dvojhlomu. Práce popisuje základní poznatky o měření výkonu, normy a funkci měřičů optického výkonu. Dále se zabývá polarizací světla a zobrazením polarizačních stavů na Poincarého kouli. V praktické části se měří optický výkon na výstupu senzoru teploty s fotodiodou a následně se správnost měření touto součástí ověřuje pomocí polarimetru. Cílem práce je miniaturizace koncového zařízení pro měření intenzity světla, tedy nahrazení drahého a velkého polarimetru levnější a menší fotodiodou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optický výkon, polarizace, Poincarého koule, dvojhlom, optické vlákno, fotodioda, senzor teploty

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of measuring optic power on the output of single mode fiber, used like temperature sensor, using birefringent. Thesis describes the basic knowledge about measuring power, standards and function of optical power meters. It also deals with polarization and representation polarization states using the Poincare sphere. In the practical portion is measured optic power on the output of the temperature sensor with a photodiode and after that is verified by a polarimeter. The aim of this thesis is miniaturization of ending device for measuring intensity of light, that means replacing expensive and large polarimeter by cheap and small photodiode.

KEYWORDS

Optic power, polarization, Poincare sphere, birefringent, fiber optics, photodiode, temperature sensor

KOLÁČKOVÁ, Aneta *Optimalizace měření optického výkonu na výstupu vláknového senzoru teploty*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 44 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miroslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Optimalizace měření optického výkonu na výstupu vláknového senzoru teploty“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autorky

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. a mému konzultantovi Ing. Martinu Kyselákovi, Ph.D. za cenné rady, metodickou, odbornou a trpělivou pomoc při zpracování bakalářské práce.

Brno

.....

podpis autorky

OBSAH

Úvod	10
1 Měření optického výkonu	11
1.1 Základní poznatky o měření výkonu	11
1.2 Normy a standardy	11
1.3 Měřiče optického výkonu	12
1.4 Snímače optického záření	14
1.4.1 Křemíkové detektory	14
1.4.2 Germaniové detektory	14
1.4.3 InGaAs detektory	14
2 Úskalí spojená s měřením polarizovaného světla	16
2.1 Polarizace	16
2.2 Stokesův formalismus	16
2.3 Stupeň polarizace (DOP)	17
2.4 Poincarého koule	17
2.5 Polarizátory	18
2.5.1 Polarizace dvojlomem	19
2.6 Dvojlom v jednovidovém optickém vlákně	20
2.7 Vlákná zachovávající polarizaci	21
3 Zapojení senzoru ověřované polarimetrem	22
3.1 Schéma zapojení	22
3.1.1 Popis schématu	22
3.2 Měření optického výkonu na zařízeních spojených konektory	23
3.2.1 S lineárním polarizátorem	23
3.2.2 Bez lineárního polarizátoru	24
3.2.3 Útlum lineárního polarizátoru	24
3.3 Měření optického výkonu na svařeném celku	25
4 Návrh zapojení	27
4.1 Fotodioda	27
4.1.1 Princip	28
4.2 Výsledný návrh schématu zapojení	28
5 Měření	30
5.1 Měření pomocí fotodiody	30
5.1.1 Uspořádání pracoviště	30

5.1.2	Popis měření	31
5.1.3	Naměřené hodnoty	31
5.2	Ověření polarimetrem	34
5.2.1	Uspořádání pracoviště	34
5.2.2	Popis měření	35
5.2.3	Naměřené hodnoty	35
6	Diskuse	39
7	Závěr	41
	Literatura	43
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Standardy pro optická vlákna	12
1.2	Měřič optického výkonu [3]	13
1.3	Blokové schéma měřiče optického výkonu [3]	13
2.1	a) světlo z přirozeného zdroje, nepolarizované b) světlo lineárně po- larizované [4]	16
2.2	Stavy polarizace na Poincarého kouli	18
2.3	Šíření paprsků o a e jednoosým krystalem, kde $\vec{P} = [k_x, k_y, 0]$ a osa x je optickou osou	19
2.4	Druhy vláken zachovávajících polarizaci: a) Eliptické b) Panda c) Mo- týlek	21
3.1	Schéma zapojení svařeného celku jako senzoru teploty	22
3.2	Zobrazení na Poincarého kouli – měření optického výkonu s lineárním polarizátorem	24
3.3	Zobrazení na Poincarého kouli – měření optického výkonu bez line- árního polarizátoru	25
3.4	Zobrazení na Poincarého kouli – měření optického výkonu na svaře- ném celku	26
3.5	Zobrazení na Poincarého kouli – měření optického výkonu na svaře- ném celku, jiný úhel	26
4.1	Navrhované schéma s fotodiodou FDS02	29
5.1	Uspořádání pracoviště pro měření na fotodiodě FDS02	30

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

4.1	Specifikace fotodiody FDS02	27
4.2	Spektrální odezva fotodiody FDS02 od firmy Thorlabs [10]	28
5.1	Změna optického výkonu na fotodiodě FDS02 při referenční teplotě 23 °C	33
5.2	Změna optického výkonu na fotodiodě FDS02 při teplotě 0 °C	33
5.3	Změna optického výkonu na fotodiodě FDS02 při teplotě 46 °C	33
5.4	Srovnání změn optického výkonu na fotodiodě FDS02 při teplotách 23 °C, 0 °C a 46 °C	34
5.5	Stokesův parametr S_2 při referenční teplotě vody v nádobě 23 °C . .	35
5.6	Stupeň polarizace (DOP) při referenční teplotě vody v nádobě 23 °C	36
5.7	Stokesův parametr S_2 při teplotě vody v nádobě 0 °C	37
5.8	Stupeň polarizace (DOP) při teplotě vody v nádobě 0 °C	37
5.9	Stokesův parametr S_2 při teplotě vody v nádobě 46 °C	38
5.10	Stupeň polarizace (DOP) při teplotě vody v nádobě 46 °C	38

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s problematikou měření optického výkonu na výstupu jednovidového optického vlákna, použitého jako senzor teploty, za pomoci dvojlomu. Dále pak ověření použitelnosti přístrojů pro návrh a realizaci měřicího pracoviště.

V úvodu práce jsou popsány základní poznatky o měření výkonu s důrazem na popis základních jednotek a práci s nimi. Poté normy, kterými se výrobci měřících přístrojů musí řídit a v neposlední řadě samotné měřicí přístroje, jejich funkce a technologie, které využívají.

Druhá kapitola se zabývá polarizací světla a zobrazováním polarizačních stavů na Poincarého kouli. Na toto téma navazují polarizátory a především polarizace dvojlomem a jeho chování v jednovidovém optickém vlákne. S tím souvisí vlákna zachovávající polarizaci neboli PM vlákna, kterým se v této části také věnuji.

Třetí kapitola obsahuje měření optického výkonu nejprve na zařízeních spojených konektory s lineárním polarizátorem a **bez** lineárního polarizátoru, a poté na svařeném celku. Schéma zapojení tohoto měření a jeho popis je uveden v úvodu této části.

Ve čtvrté kapitole se zaměřujeme na návrh zapojení, jehož cílem je miniaturizace celého zařízení a dostupnost pro běžného uživatele. Obsahuje popis vybrané fotodiody a její princip. Součástí je také schéma výsledného zapojení.

Pátá kapitola představuje hlavní měření této práce. Bylo zde provedeno měření na fotodiodě a následně její ověření s polarimetrem.

Výsledky naměřené v předchozí kapitole se diskutují a porovnávají v kapitole šesté.

V závěru jsou shrnuty veškeré poznatky uvedené v této bakalářské práci.

1 MĚŘENÍ OPTICKÉHO VÝKONU

1.1 Základní poznatky o měření výkonu

Jedním z nejzákladnějších měření u optických vláken je měření optického výkonu. Toto měření je základem pro měření útlumu, tj. rozdílu síly signálu na jednom konci vedení (popřípadě kabelu) oproti druhému konci.

Výkon přenášený zářením vyjadřujeme právě výkonem optického záření P [W]. Je určen energií procházející sledovanou plochou v jednotkách času. Naopak v optoelektronice se používají pro měření optického výkonu L decibely absolutní [dBm]. Vyjadřuje se tím úroveň optického výkonu vztažená k jednomu miliwattu

$$L = 10 \log \frac{P[mW]}{1[mW]} \quad . \quad (1.1)$$

Pomocí veličiny L lze snadno stanovit útlum A v decibelech relativních [dB] podle vzorce

$$A = L_2 - L_1 \quad , \quad (1.2)$$

kde L_1 a L_2 jsou úrovně výkonu získané např. při měření na vstupu a výstupu optické trasy. Měřiče optického výkonu mívají funkci reference, která umožňuje uložit do paměti referenční výkon P_1 a následně měřit relativní úroveň L_r libovolného optického výkonu vůči této referenci. Útlum A je pak

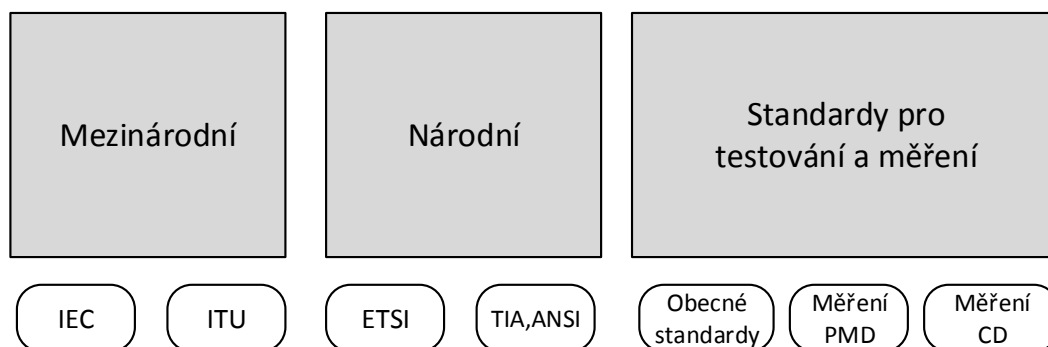
$$A = -L_r = -10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (1.3)$$

a my ho můžeme odečíst, až na znaménko, přímo na displeji přístroje [1].

Útlum bývá na měřicích přístrojích zobrazován jako záporné číslo stejně jako většina měření optického výkonu. Je to dáno tím, že decibel je bezrozměrná jednotka, sama o sobě tedy nemá žádný fyzikální rozměr, ale vyjadřuje poměr mezi dvěma veličinami. Jelikož poměr těchto veličin může dosahovat velice malých nebo velkých hodnot, je nutné ho logaritmovat. V případě optického výkonu uváděného v dBm bude hodnota kladná jen tehdy, pokud výkon přijímaného signálu bude větší než 1 mW. Neznamená to, že by byl výkon záporný, ale pouze je nižší než vztažná hodnota 1 mW.

1.2 Normy a standardy

Na trhu působí mnoho výrobců měřicích přístrojů, a proto aby tato měření byla vzájemně porovnatelná, je nutné dodržovat normy a standardy. Optická vlákna, jejich



Obr. 1.1: Standardy pro optická vlákna

vlastnosti a způsoby měření jsou definovány v různých standardech, dle rozdílných hledisek.

Na mezinárodní úrovni jsou to organizace IEC (International Electrotechnical Commission) nebo ITU (International Telecommunication Union). Do národní nebo oblastní působnosti lze zařadit evropskou organizace ETSI (European Telecommunication Standards Institute) a americké organizace jako TIA (Telecommunication Industries Association) a ANSI (American National Standards Institute) [2].

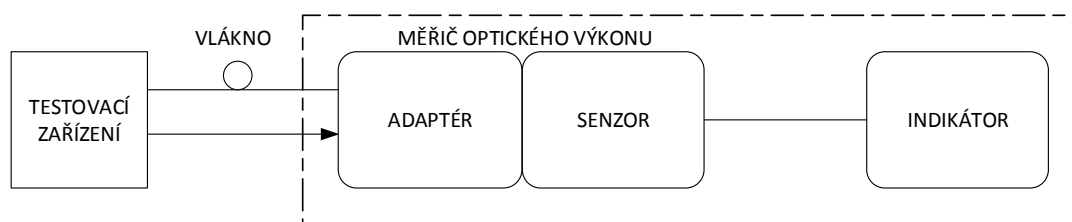
Pro naše měření jsou nejdůležitější obecné standardy IEC 61350– Kalibrace měřičů optického výkonu a G.650.1 – Definice a metody testování lineárních a deterministických vlastností jednovídných vláken a kabelů.

1.3 Měřiče optického výkonu

Jak již bylo zmíněno, měření optického výkonu je jedno z nejzákladnějších měření v oblasti optických měření. Toto měření se provádí přeměnou výkonu světelného paprsku, který je emitován přímo různými světelnými zdroji nebo vystupuje z optického vlákna, na elektrický signál pomocí optickoelektronického (O/E) konvertoru, dle [3].

Jak bylo nastudováno v [3] měřiče optického výkonu jsou tvořeny ze tří částí: indikátoru, senzoru a adaptéru, viz Obr. 1.2. Adaptér slouží k úpravě světelného toku ze zdroje nebo vlákna tak, aby byl co nejvíce přizpůsoben rozměru senzoru. To má za následek přivedení co největšího optického výkonu na senzor. Optický výkon je na senzoru transformován na elektrický a indikátor tento elektrický signál zobrazí na displeji.

Všechny tyto části měřiče optického výkonu lze modifikovat pro použitelnost v jiných vlnových délkách a pro různé typy příjmu signálu.

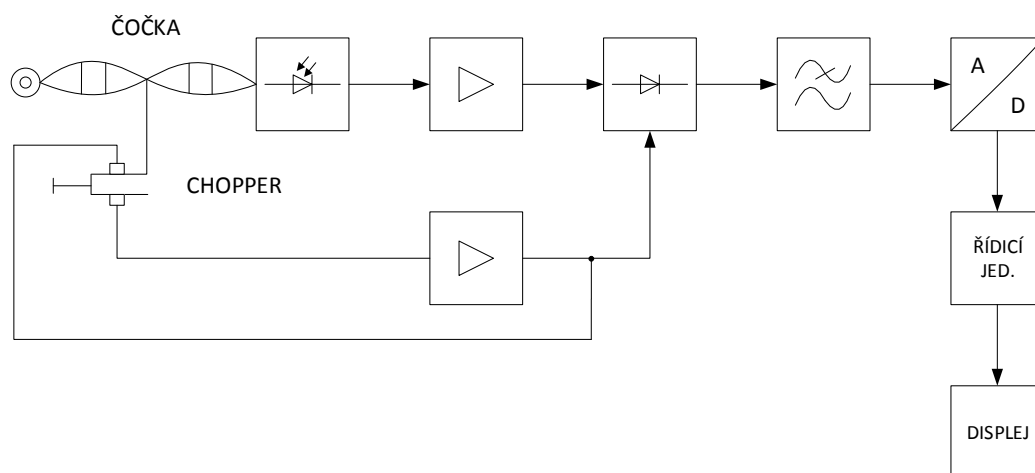


Obr. 1.2: Měřič optického výkonu [3]

Měřením je možné zjišťovat ztráty ve vláknech (útlum vlákna), činnost optoelektronických měničů a modulů (vysílače a přijímače) nebo ztráty ve spojkách na dané optické trase.

Pro získání přesných výsledků musí být optický měřič výkonu nastaven na vlnovou délku odpovídající použitým elektrooptickým a optoelektronickým převodníkům, které jsou hlavními prvky zdrojů a přijímačů.

Na Obr. 1.3 je zobrazeno blokové schéma měřiče optického výkonu. Skládá se z čočky, A/D převodníku, řídicí jednotky, displeje a chopperu. Chopper se používá pro zvýšení citlivosti přijímače přerušováním optického signálu s následnou synchronní detekcí. Tímto zapojením lze dosáhnout zlepšení citlivosti asi o 20 dB [3].



Obr. 1.3: Blokové schéma měřiče optického výkonu [3]

1.4 Snímače optického záření

Měřiče optického výkonu obvykle využívají polovodičové detektory, protože jsou citlivé na světlo ve vlnových délkách a výkonových úrovních používaných v optických vláknech. Většina měřičů optického výkonu se dnes vyrábí s detektory z křemíku (Si), germania (Ge) nebo India-Gallia-Arsenidu (InGaAs).

1.4.1 Křemíkové detektory

Křemíkové detektory jsou citlivé na světlo v rozmezí od 400 nm do 1100 nm vlnové délky v závislosti na způsobu výroby. Jedná se o nízkošumové fotodiody, které mají nízký „temný proud“ (dark current) tj. proud, který prochází fotodiodou, na niž nedopadá žádné světlo. Roste s předepínajícím napětím a ziskem diody.

Obvyklá úroveň šumu (tzn. výkon, který ruší užitečný signál) na optických zařízeních využívající Si detektory je od -70 dBm do -90 dBm nebo od 1 pW do 100 pW. Další výhodou je jejich nízká kapacitance. Pokud je vysoká, snižuje přenosové rychlosti.

1.4.2 Germaniové detektory

Germaniové detektory jsou citlivé na světlo v rozmezí od 800 nm do 1800 nm vlnové délky. To je dělá použitelné pro všechny systémy s optickými vlákny, včetně jednovidových systémů s 1300 nm a 1550 nm vlnové délky. Při měření nižších vlnových délek mají Ge detektory vyšší šum. Tento šum je přímo úměrný ploše detektoru. Z toho vyplývá, že při použití menšího detektoru získáme nižší úroveň šumu. Nevýhodou malých detektorů je ale nutnost umístění konce vlákna do středu detektoru, přímo u nejcitlivější oblasti.

Někteří výrobci měřičů optického výkonu chladí tyto velké Ge detektory z důvodu snížení šumu a zisku nižších naměřených hodnot pomocí termoelektrického chlazení. To vede k citlivějšímu měření, ale na úkor větší hmotnosti a kratší životnosti baterie přístroje.

1.4.3 InGaAs detektory

Dalším řešením pro měření extrémně malých vlnových délek 1300 nm a 1550 nm, je využití technologie detektoru InGaAs. Byla vyvinuta pro přijímače vysokorychlostních komunikačních systémů. InGaAs detektory mají stejný rozsah citlivosti jako Ge detektory, ale mají mnohem menší šum a vysokou rychlost odezvy. S tímto typem detektorů je možné snadno změřit hodnoty optického výkonu s přesností až

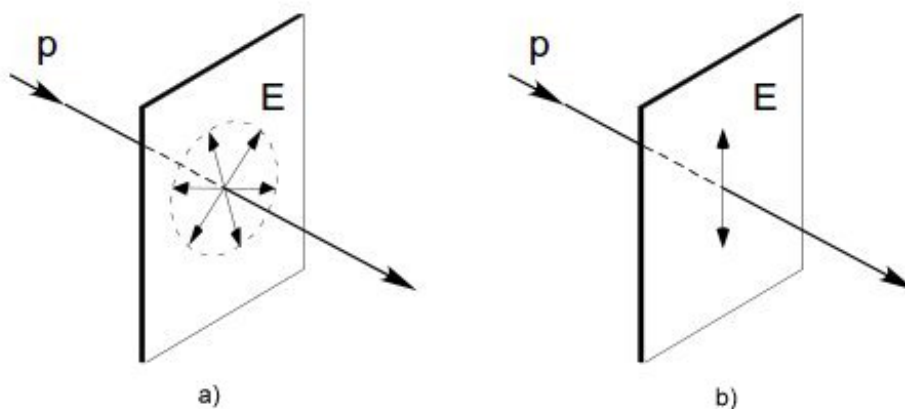
do -65 dBm, což je méně než $0,5$ nW. Nevýhodou je cena, která omezuje jejich použití jen pro nejdražší přístroje.

2 ÚSKALÍ SPOJENÁ S MĚŘENÍM POLARIZOVANÉHO SVĚTLA

2.1 Polarizace

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, kde vektor intenzity elektrického pole \vec{E} je vždy kolmý na směr, kterým se vlnění šíří. Vektor \vec{E} tedy leží v rovině, na niž je kolmý paprsek světla. U přirozeného světla je směr vektoru \vec{E} v dané rovině zcela nahodilý a takovému světlu říkáme nepolarizované, viz Obr. 2.1a [4].

Pokud vektor \vec{E} kmitá stále v jedné přímce, jedná se o světlo lineárně polarizované viz Obr. 2.1b. Přirozené nepolarizované světlo jsme schopni přeměnit na světlo polarizované např. odrazem a lomem, absorpcí nebo pro nás nejdůležitějším dvojlomem.



Obr. 2.1: a) světlo z přirozeného zdroje, nepolarizované b) světlo lineárně polarizované [4]

2.2 Stokesův formalismus

Stokesův formalismus je popis polarizace, který využívá 4 Stokesovy parametry. Tyto parametry jsou funkcí pozorovatelné světelné vlny a lze s nimi popsat stav polarizace každého světelného paprsku. Jsou ve tvaru:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

kde S_0 značí celkovou intenzitu dopadajícího světelného paprsku I . Zbylé tři parametry jsou rozdíly mezi změřenou intenzitou polarizačních párů. Parametr S_1 představuje vertikální a horizontální polarizaci. S_2 parametr polarizaci pod úhly 45° a -45° k ose x a S_3 reprezentuje rozdíl mezi levotočivou a pravotočivou kruhovou polarizací.[5]

2.3 Stupeň polarizace (DOP)

Stupeň polarizace (Degree of Polarization) představuje průměrný stav polarizace světla přes široký spektrální rozsah. Je definován také jako průměr za určitou dobu.[6] DOP je založen na Stokesových parametrech a je vyjádřen:

$$DOP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} . \quad (2.2)$$

Stupeň polarizace nabývá hodnot od 0 do 1. V případě, že DOP je rovno 0, jedná se o světlo nepolarizované. Naopak, když DOP je 1, hovoříme o světle zcela polarizovaném. Veličina DOP nám tedy udává jak moc je světlo polarizováno, nicméně neudává zda je polarizováno lineárně nebo kruhově. Proto se zavedly pomocné veličiny DOP_L (stupeň lineární polarizace), která je vyjádřena

$$DOP_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} , \quad (2.3)$$

a DOP_C (stupeň kruhové polarizace) definovaný

$$DOP_C = \frac{V}{I} = \frac{S_3}{S_0} . \quad (2.4)$$

Lze tedy odvodit, že stupeň polarizace je

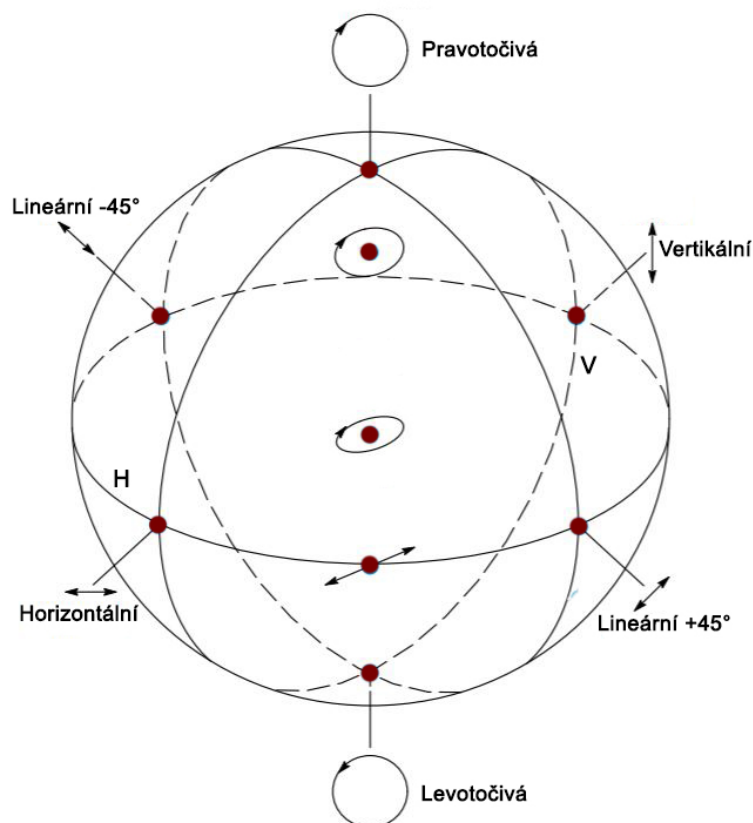
$$DOP = \sqrt{(DOP_L)^2 + (DOP_C)^2} . \quad (2.5)$$

2.4 Poincarého koule

Poincarého koule je grafický prostředek, pomocí kterého jsme schopni zobrazit polarizační stavy ve 3D prostoru. Každý z jednotlivých stavů polarizace je představován bodem na povrchu koule. Tento bod je koncovým bodem vektoru s počátkem ve středu koule.

Stupeň polarizace se odvíjí od vzdálenosti bodu od středu Poincarého koule. V případě, že se bod nachází v tomto středu, jedná se o nepolarizované světlo. Naopak pokud na povrchu, tak o zcela polarizované světlo.

Póly představují levotočivou a pravotočivou kruhovou polarizaci, viz Obr. 2.2. Body na rovníku značí lineární polarizaci. Zvolíme-li bod H na rovníku, bude nám označovat horizontální lineární polarizaci. Bod V představuje vertikální lineární polarizaci. Eliptické polarizované stavy jsou mezi rovníky a póly, tedy všude jinde na povrchu.



Obr. 2.2: Stavy polarizace na Poincarého kouli

2.5 Polarizátory

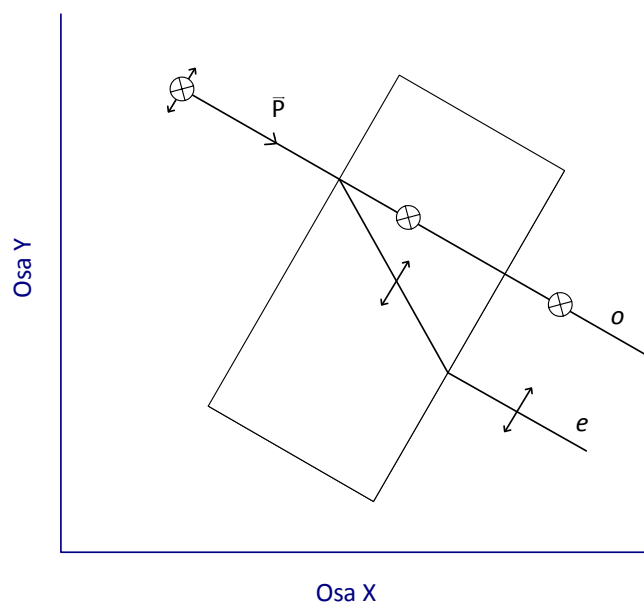
Polarizátory jsou zařízení, která využíváme pro přeměnu nepolarizovaného světla na světlo polarizované.

Jejich rozdělení je dáno podle výsledné polarizace světla. Dělí se na lineární, kruhové a eliptické. Pro naši práci jsou nejdůležitější lineární polarizátory, které propustí polarizovanou vlnu ve směru osy polarizátoru. Jednou z metod pro vytvoření lineárně polarizovaného světla je polarizace selektivním odrazem v anizotropním prostředí neboli dvojlom.

2.5.1 Polarizace dvojlomem

Optické prostředí dělíme na dvě skupiny, izotropní a anizotropní. V izotropním prostředí se světlo šíří ve všech směrech stejnou rychlostí a s libovolnou polarizací. Příkladem je sklo. V anizotropním prostředí již rychlost šíření závisí na směru světla a jeho rychlosti a v různých směrech je různá. Toto prostředí vytváří např. islandský vápenec. Vstupující paprsek se na rozhraní s krystalem rozdělí na dvě vzájemně kolmé polarizované složky: paprsek řádný o (ordinary) a paprsek mimořádný e (extraordinary). Tyto složky jsou lineárně polarizované.

Chování těchto paprsků je odlišné podle druhu krystalu. Existují dva typy krystalů - jednoosé a dvouosé. Jak již název napovídá v jednoosých krystalech je pouze jedna optická osa. V dvouosých krystalech jsou optické osy dvě. V případě, že se světlo bude šířit v jednoosém krystalu ve směru optické osy, nenastane dvojlom. Oba paprsky mají stejnou rychlost a tímto směrem se může šířit i světlo nepolarizované. Průběh dopadu paprsku na jednoosý krystal je zobrazen na Obr. 2.3 a popsán níže.



Obr. 2.3: Šíření paprsků o a e jednoosým krystalem, kde $\vec{P} = [k_x, k_y, 0]$ a osa x je optickou osou

Paprsek řádný o lze vidět na Obr. 2.3. Je polarizovaný kolmo k rovině nákresu a prochází krystalem pod nulovým úhlem lomu s nezměněnou polarizací. Jelikož podle předpokladu je úhel dopadu také nulový, lze konstatovat, že platí Snellův zá-

kon lomu, viz rovnice (2.6). Tento zákon by byl splněn i v případě kolmo polarizovaného paprsku při obecném úhlu dopadu.

Podle Snellova zákona platí, uvažujme-li dvě různá prostředí, jejichž rozhraní je rovinné a jsou-li indexy lomu těchto dvou prostředí n_1 resp. n_2 a označíme-li úhel dopadajícího svazku α a úhel lomeného svazku β , pak podle Snellova zákona platí

$$n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\beta) \quad (2.6)$$

nebo také v jiném tvaru v_1 a v_2 jsou rychlosti šíření vlnění v daném prostředí, pak platí

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.7)$$

Úhly se vždy měří od normály neboli kolmice. Při kolmém dopadu je úhel $\alpha=\beta=0$ [8].

Paprsek mimořádný e nemění při lomu směr své polarizace, ale jeho směr šíření a jeho polarizace v krystalu již nejsou nadále kolmé na optickou osu x . Polarizace s ní svírá obecný úhel. Z toho vyplývá, že Snellův zákon není v tomto případě splněn.

V dvouosém krystalu jsou oba paprsky mimořádné v tom smyslu, že jejich rychlost závisí na směru šíření v krystalu.

Přirozený dvojlom nastává pouze v látkách anizotropních. V izotropních látkách jsme schopni dosáhnout umělého dvojlomu. Lze toho dosáhnout vnějším tlakem, ohybem, působením elektrického pole či zahříváním.

2.6 Dvojlom v jednovidovém optickém vlákně

Dvojlom vlákna představuje stav, kdy vlákno vykazuje pro různě orientované vybuzené vidy různý index lomu [9]. To způsobuje, že dochází k otáčení polarizačního vektoru a tím k přelévání energie v podobě optického výkonu mezi jednotlivými osami (vertikální a horizontální).

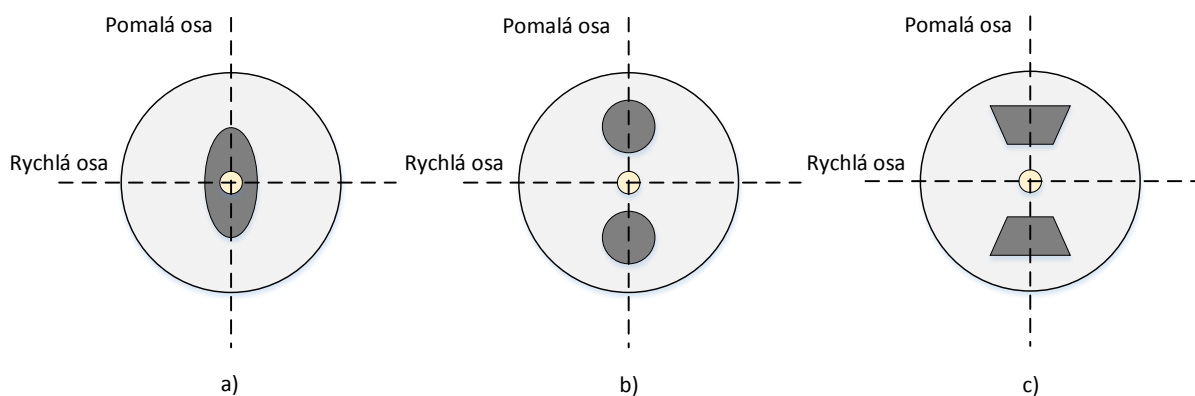
Dvojlom v jednovidovém optickém vlákně může nastat z několika důvodů. Lze je obecně rozdělit na vlastní a způsobené vnějším vlivem. Vlastní dvojlom může být způsoben nedokonalou technologií výroby. Příkladem je eliptický tvar jádra nebo vzduchová kapsle ve skle či nečistoty. Vnější vlivem je především myšlen mechanický nebo teplotní vliv. Při instalaci vlákna dochází k jeho ohybu, tlaku na vlákno nebo zahřívání. Ačkoliv by se mohlo zdát, že se jedná o nežádoucí jev, my této schopnosti vybuzení dvojlomu při změně teploty využijeme pro naše měření, viz kapitoly 3, 4 a 5.

2.7 Vlákná zachovávající polarizaci

Vlákná zachovávající polarizaci jsou speciální typy jednovlákových vláken (PM - Polarization maintaining). Tato vlákna umí zachovat polarizační stav vlny v jádře během jejího šíření, pomocí stejné rychlosti šíření optického signálu v pomalé a rychlé ose. Klasická jednovláková vlákna toho schopna nejsou.

Při ideálním navázání optického svazku do jádra nedochází u PM vláken k dvoj-
lomu, tedy předávání optického výkonu mezi rychlou a pomalou osou. K předávání optického výkonu dochází, ale jen za určitých podmínek, jako je zahřívání a ochlazení vlákna, které vyvoláme při našem měření.

PM vlákna se nejčastěji vyrábějí ve 3 modifikacích: Eliptické, Panda nebo Motýlek. Tato vlákna mají při výrobě do pláště zavedeny vnitřní napěťové komponenty, díky kterým polarizace zůstává ve vlákně zachována a které také způsobují menší závislost na vnějších vlivech.



Obr. 2.4: Druhy vláken zachovávajících polarizaci: a) Eliptické b) Panda c) Motýlek

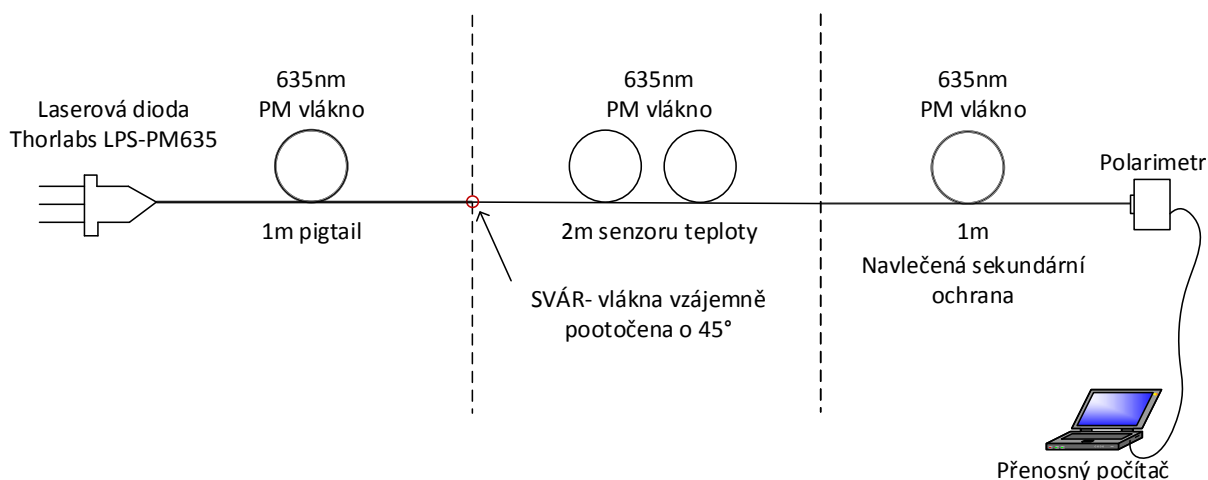
V eliptických PM vláknech se využívá nesymetričnosti jádra. Vlákná typu Panda a Motýlek používají dva stresory. Ty jsou souběžné s pomalou osou a liší se mezi sebou tvarem, viz Obr. 2.4. V této práci budeme využívat PM vlákna typu Panda.

3 ZAPOJENÍ SENZORU OVĚŘOVANÉ POLARIMETREM

V teoretické části jsme objasnili všechny informace potřebné k tomuto měření, jako jsou PM vlákna, polarizace nebo dvojlom. V praktické části se budeme věnovat optickému výkonu na výstupu senzoru teploty. Nejprve ve variantě pospojované konektory a následně na jednom celku svařeném pro naše účely. Těmito měřeními ověříme funkčnost jednotlivých zařízení a zjistíme jejich použitelnost pro náš návrh.

Veškerá měření jsme vyhodnocovali pomocí polarimetru s hlavicí PAN 5710 VIS od firmy Thorlabs. Díky polarimetru jsme schopni graficky vidět polarizační stavy na Poincarého kouli. Změnu teploty jsme prováděli přiložením ruky nad senzor teploty. Vlákna použitá pro tato měření jsou singlemodová (jednovidová) a pro tuto práci uvažujeme vlnovou délku 635 nm.

3.1 Schéma zapojení



Obr. 3.1: Schéma zapojení svařeného celku jako senzoru teploty

3.1.1 Popis schématu

Laserová dioda LPS-PM635-FC je připojena ke zdroji světla, kontroléru proudu CLD 10-10 od firmy Thorlabs. Z něj vede 1 metr PM vlákna (pigtail). Jelikož se jedná o laserovou diodu, která vyzařuje kvalitní koherentní polarizované světlo, je zde

vysoký stupeň polarizovaného světla, který se blíží 100 %. Odpadá tedy potřeba světlo znovu polarizovat, či ho jinak upravovat.

Světlo je lineárně polarizované a to vertikálně, souběžně s pomalou osou. Pokud by takové světlo prošlo senzorem teploty, pak zahřívání nebo ochlazování nebude mít žádný vliv a k dvojlomu nedojde. Respektive k dvojlomu bude docházet, ale druhý paprsek bude vždy nulový. Řešením je, aby světlo nevstupovalo do senzoru ani v jednom z ideálních stavů horizontálně nebo vertikálně polarizované, ale aby světlo bylo polarizované mezi těmito dvěma osami, tedy pootočené o 45° . Tím vybudíme obě osy zároveň, čímž vznikne kruhová polarizace. Vlivem teploty bude docházet ke spontánnímu dvojlomu, kdy bude vítězit jedna složka nebo druhá, anebo si budou energii předávat.

Na posledním úseku PM vlákna v délce 1 metr je navlečena sekundární ochrana, aby se zamezilo vlivu teploty mimo senzor. Toto vlákno je připojeno k polarimetru s hlavicí typu PAN 5710 VIS od firmy Thorlabs, který nám vynáší výsledné hodnoty na připojeném PC.

Při měření zapojení pospojovaném konektory je před polarimetr umístěn lineární polarizátor Lightcomm 635 nm, ten již na schématu zobrazen není. Tento polarizátor blokuje rychlou osu, takže propouští jen pomalou, tedy vertikální. Jedná se o velice kvalitní polarizátor, u kterého výrobce uvádí, že vstupní útlum je menší než 2,8 dB. Tento fakt ověříme v našem měření.

3.2 Měření optického výkonu na zařízeních spojených konektory

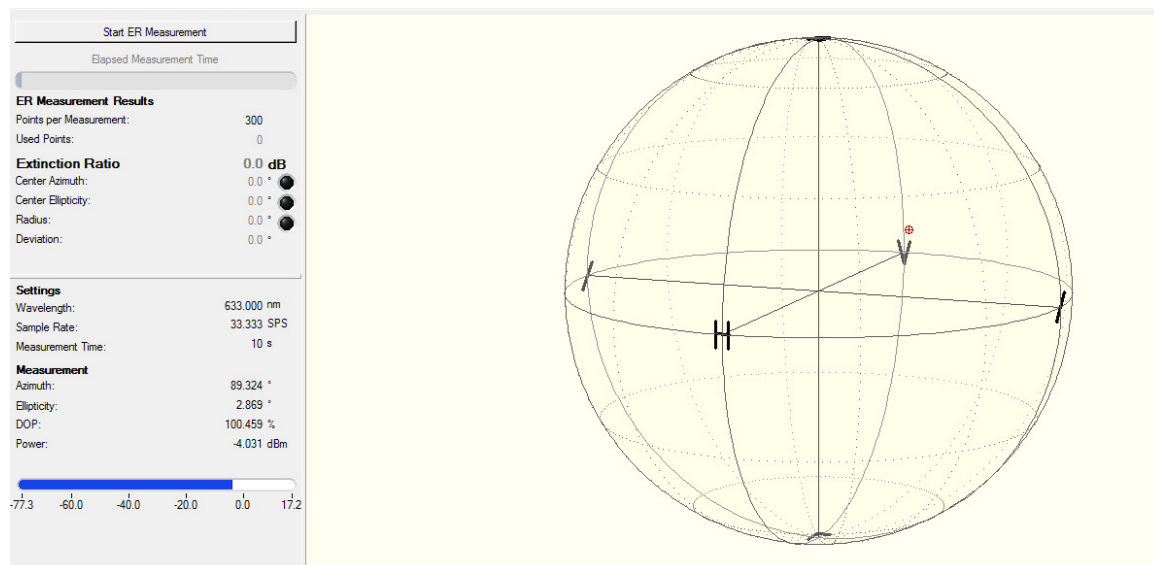
Jedná se o stejné zapojení jako na Obr. 3.1, pouze na místo sváru je pigtail spojen se senzorem teploty pomocí spojky FC/FC. Za vláknovým senzorem (senzor teploty) následuje vlákno zachovávající polarizaci (se sekundární ochranou), které je také napojeno přes spojku FC/FC. Toto vlákno je při prvním měření napojeno do polarimetru přes lineární polarizátor Lightcomm 635 nm a ve druhém měření přímo do polarimetru.

3.2.1 S lineárním polarizátorem

Použitý polarizátor Lightcomm 635 nm je sestaven tak, aby blokoval rychlou osu a propouštěl pomalou osu. Výsledkem je světlo, které je polarizováno do vertikální osy, jiné světlo polarizátor nepropustí. Správnou funkčnost polarizátoru jsme ověřili při měření, viz Obr. 3.2. Naměřený optický výkon je $-4,031$ dBm.

3.2.2 Bez lineárního polarizátoru

Při působení tepla na senzor teploty se bod po Poincarého kouli již hýbe, viz Obr. 3.3. Není zde lineární polarizátor, zařízení je citlivé na teplotu a v souvislosti se změnami teploty se mění okamžitý stav polarizace světla. Dochází k enormní výměně energií mezi rovinami polarizace, tedy mezi pomalou a rychlou osou. Když zdroj tepla od senzoru odstraníme, bod se vrací po stejné trajektorii zpátky. Optický výkon je 0,363 dBm.



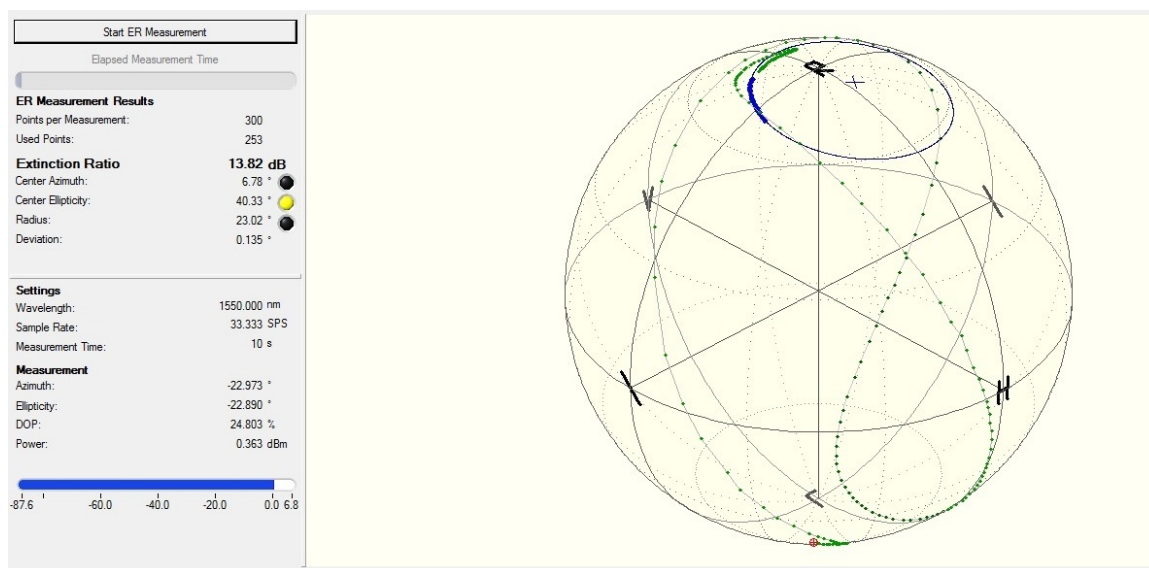
Obr. 3.2: Zobrazení na Poincarého kouli – měření optického výkonu s lineárním polarizátorem

3.2.3 Útlum lineárního polarizátoru

Pomocí měření optického výkonu s lineárním polarizátorem a **bez** lineárního polarizátoru jsme schopni odvodit jaký je skutečný útlum lineárního polarizátoru firmy Lightcomm. Výrobce deklaruje útlum menší než 2,8 dB. Útlum vypočítáme rozdílem optických výkonů z obou měření podle rovnice (3.1), kde $L_s = -4,031$ dBm je optický výkon s polarizátorem a $L_b = 0,363$ dBm **bez** polarizátoru

$$L_b - L_s = 0,363 - (-4,031) = 4,394 \text{ [dB]} \quad . \quad (3.1)$$

Z tohoto výpočtu vyplývá, že skutečný útlum lineárního polarizátoru je okolo 4,394 dB, což je hodnota vyšší než uvádí výrobce. I přesto se jedná o kvalitní polarizátor, který v návrhu využijeme.

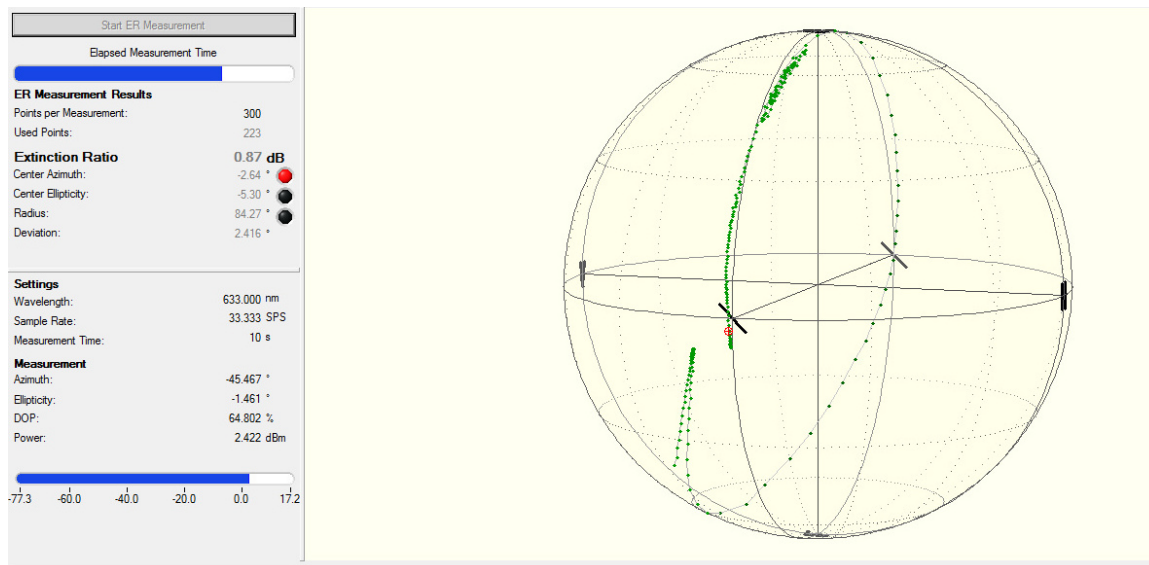


Obr. 3.3: Zobrazení na Poincarého kouli – měření optického výkonu **bez** lineárního polarizátoru

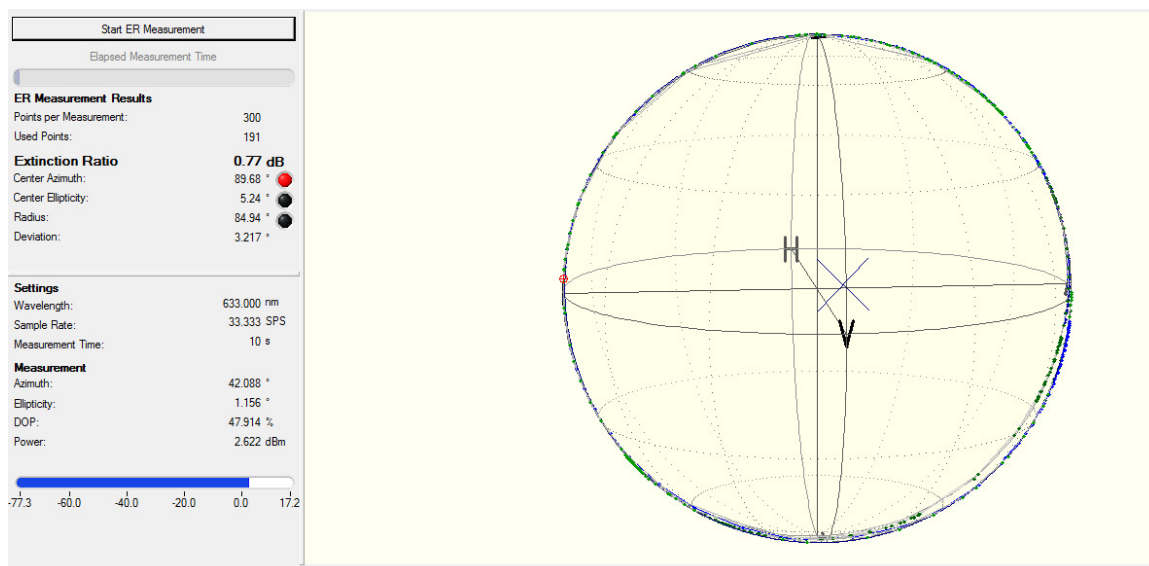
3.3 Měření optického výkonu na svařeném celku

Schéma zapojení měření na svařeném celku je zobrazeno na Obr. 3.1. Měření optického výkonu je mnohem citlivější, protože zapojení neobsahuje konektory, které by způsobovaly útlum. Hodnoty optického výkonu se pohybují okolo 2,422 dBm, viz Obr. 3.4. Při zahřívání dochází k tomu, že se bod točí po kružnici, viz Obr. 3.5. V předešlém měření s konektory jsme této skutečnosti nedocílili.

Pokud takový vývoj polarizovaného světla lineárně polarizujeme, tak se nám maximálně bude měnit intenzita světla v daném bodě. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou výkonu bude mnohem výraznější, než v předešlém měření s konektory. To znamená, že tento svařený celek bude vhodné využít pro náš návrh zařízení.



Obr. 3.4: Zobrazení na Poincarého kouli – měření optického výkonu na svařeném celku



Obr. 3.5: Zobrazení na Poincarého kouli – měření optického výkonu na svařeném celku, jiný úhel

4 NÁVRH ZAPOJENÍ

Cílem naší práce je miniaturizace měřicího zařízení a jeho dostupnost pro běžného uživatele. Na trhu je dostupných mnoho zařízení pro snímání teploty. Optické vlákno jako senzor teploty se odlišuje tím, že je neobyčejně citlivé. Naším úkolem je zaměřit se na koncovou část vyhodnocování intenzity světla.

V předchozích měřeních byl na výstupu teplotního senzoru polarimetr, pomocí něhož jsme měřili optický výkon. Toto zařízení lze nahradit levnější a kompaktnější součástí - fotodiodou.

Pro zaznamenání změn optického výkonu naměřeného pomocí fotodiody použijeme nejprve měřič optického výkonu ČSA-VÚD a poté, z důvodu přenesení hodnot do PC, moderní multimetr Agilent 34450A.

Funkčnost fotodiody budeme testovat opět na polarimetru, který je schopný zaznamenat stupeň polarizace a jednotlivé Stokesovy parametry potřebné k porovnání s výstupy námi naměřenými na fotodiodě. Zjistíme tak s dostatečnou přesností, zda je tato součástka použitelná a s jakou citlivostí je schopná měřit.

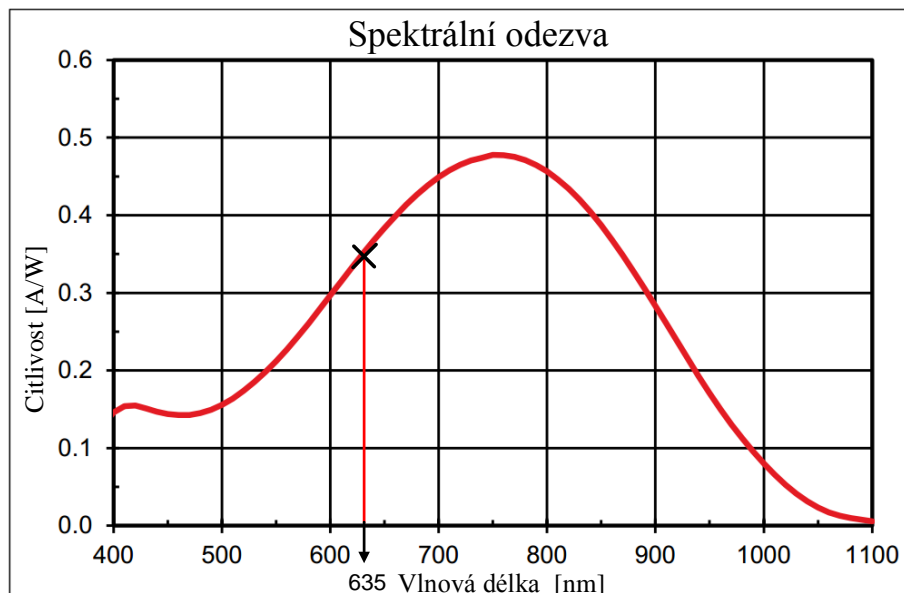
4.1 Fotodioda

Fotodioda je jako součástka dostatečně malá a přesná, abychom s ní byli schopni intenzitu světla vyhodnocovat. Důležitý parametr je rychlost fotodiody, protože chceme dosáhnout toho, aby optický výkon dopadajícího světla odpovídal co nejvíce skutečnosti. V celém měření uvažujeme vlnovou délku 635 nm, proto bude pro náš návrh zapojení vhodná křemíková vysokorychlostní fotodioda FDS02 od firmy Thorlabs. Její specifikace jsou uvedeny v Tab. 4.1, převzaté ze specifikačního listu [10].

Specifikace	
Materiál	Si
Rozsah vlnových délek	400 nm-1100 nm
Vrcholová vlnová délka	750 nm
Citlivost	0.48 A/W
Aktivní plocha	0.049 mm ² (Ø0.25 mm)
Doba náběhu pulsu/sestupu pulsu ($R_L = 50 \Omega$)	47 ps / 246 ps
NEP, Typical(850 nm, 20 V)	9.29x 10 ⁻¹⁵ W/Hz ^{1/2}
Temný proud (5 V)	35pA (Typ.)
Kapacitance (5 V)	0.94pF (Typ.)
Obal	TO-46, FC/PC Bulkhead

Tab. 4.1: Specifikace fotodiody FDS02

Dle specifikačního listu [10] je tato fotodioda nejcitlivější při vlnové délce 750 nm, jak lze vidět z Grafu 4.2. Hodnota citlivosti pro 635 nm se pohybuje okolo 0,35 A/W, což považujeme za dostačující.



Graf 4.2: Spektrální odezva fotodiody FDS02 od firmy Thorlabs [10]

4.1.1 Princip

Funkce fotodiody je založena na principu vnitřního fotoelektrického jevu. Když foton o dostatečné energii dopadne na PN přechod diody, dojde k tomu, že v oblasti přechodu vznikne pár elektron a díra. Elektron putuje do oblasti N, zatímco díra do oblasti P. Vzniká tak potenciálový rozdíl. Čím více fotonů bude dopadat na PN přechod, tím větší potenciálový rozdíl bude. Z toho vyplývá, že s intenzitou osvětlení PN přechodu roste proud protékající přechodem.

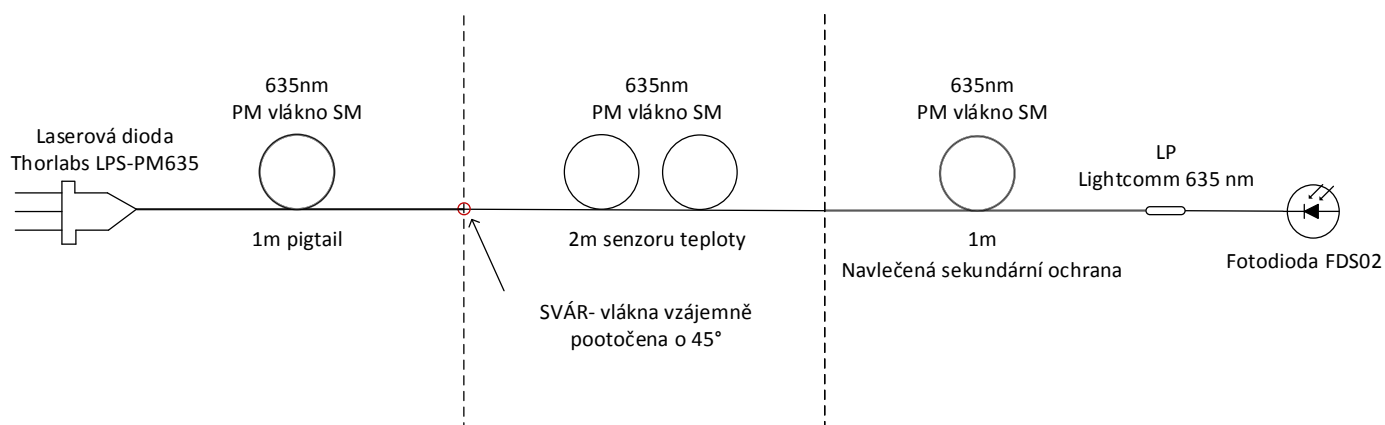
Fotodioda může být zapojena v propustném nebo závěrném směru. Pro naše měření použijeme závěrný směr. V závěrném směru teče fotodiodou proud tvořený minoritními nosiči, které vznikly odtržením elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Výstupní proud je tedy přímo úměrný koncentraci minoritních nosičů.

4.2 Výsledný návrh schématu zapojení

Zapojení s využitím fotodiody je zobrazeno na Obr. 4.1. V tomto zapojení využijeme svařený celek, jehož funkčnost jsme ověřili v kapitole 3.3. Ten je napojen

do lineárního polarizátoru a následně do fotodiody, která je zapojena v závěrném směru. Fotodiodou budeme měřit změny optického výkonu na výstupu senzoru teploty. Hodnoty se zaznamenají a vynesou do grafu pro následné porovnání.

Pro ověření funkčnosti měření fotodiody využijeme zapojení s polarimetrem PAX5710 zobrazené na Obr. 3.1, které jsme testovali v kapitole 3.3. V tomto případě budeme vyhodnocovat stupeň polarizace DOP a Stokesův parametr S_2 . Tyto údaje využijeme k porovnání s hodnotami naměřenými fotodiodou FDS02. Tím se ověří správnost měření fotodiodou.



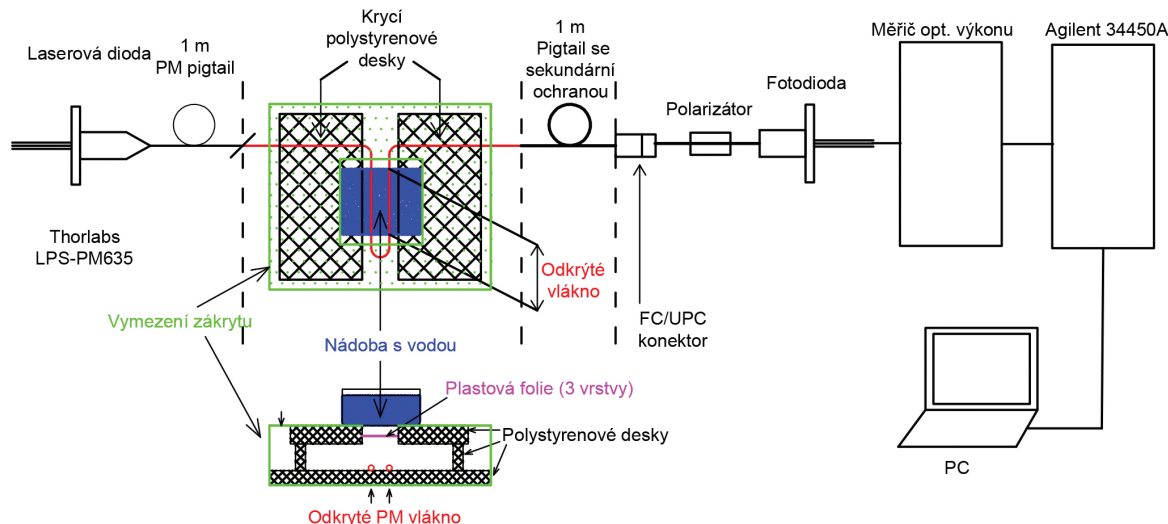
Obr. 4.1: Navrhované schéma s fotodiodou FDS02

5 MĚŘENÍ

Měření v této kapitole se již věnuje samotnému ověření funkčnosti fotodiody FDS02 od firmy Thorlabs, jakožto výstupu na vláknovém senzoru teploty. Její testování probíhalo přiložením nádoby s 1 l vody o rozdílných teplotách k odkrytému optickému svazku. Poté za stejných teplotních podmínek došlo k měření na polarimetru, z důvodu ověření měření na fotodiodě. Tato měření se prováděla pro vlnovou délku 635 nm. Naším cílem je dokázat možnost měření změn teploty na vláknovém senzoru pomocí fotodiody.

5.1 Měření pomocí fotodiody

5.1.1 Uspořádání pracoviště



Obr. 5.1: Uspořádání pracoviště pro měření na fotodiodě FDS02

Jak lze vidět na obrázku Obr. 5.1 jako zdroj byla použita laserová dioda LPS-PM635-FC, napojená ke kontroléru proudu CLD 10-10 od firmy Thorlabs. Z něj vede svařený celek ověřovaný v kapitole 3.3, tvořený 1 metrem PM vlákna (pigtail), 2 metry odkrytého vlákna a 1 metrem dalšího PM vlákna se sekundární ochranou.

Na Obr. 5.1 je zobrazen pohled ze shora a z profilu na zákryt chránící 2 metry odkrytého vlákna. Zákryt je tvořen polystyrenovými deskami a plastovou folií, která vyplňuje třemi vrstvami prostor mezi deskami. Celá tato ochrana slouží k odstranění vlivu proudění okolního vzduchu a teploty okolí na optický senzor při přiložení nádoby s 1 litrem vody.

Dále pak je svár napojen FC/UPC konektorem na polarizátor Lightcomm 635 nm testovaný v kapitole 3.2. Ten je zapojen do fotodiody FDS02, jejíž výstup je připojen do měřiče optického výkonu ČSA-VÚD.

Měřič optického výkonu ČSA-VÚD se zpočátku nejevil jako ideální přístroj pro naše potřeby a to ze dvou důvodů: zaprvé nebylo ho možno připojit přímo do PC a zadruhé z důvodu stáří zařízení ho nelze zkalibrovat. První problém byl vyřešen díky převodníku optického výkonu na napětí na jednom z výstupů na měřiči ČSA-VÚD. Na tento výstup se poté zapojil již moderní multimetr Agilent 34450A, který se pomocí USB připojil k PC, viz Obr. 5.1. V PC se hodnoty zaznamenávají programem Exel s využitím knihovny AnexC. Tímto se druhá komplikace ukázala být bezpředmětná, protože důležité v našem případě jsou relativní hodnoty a ne hodnoty absolutní. Naším cílem není měřit přesné hodnoty, ale jde nám o změnu měřených hodnot.

5.1.2 Popis měření

Měření bylo provedeno při třech různých teplotách, čehož se docílilo přiložením nádoby s 1 l vody o teplotách 23 °C, 0 °C a 46 °C. Nejprve byla použita nádoba s odstátou vodou o pokojové teplotě 23 °C. Dále pak nádoba s ledovou tříští při 0 °C a na závěr nádoba s vodou ohřátou na 46 °C.

Celková doba jednoho měření byla 660 s. V čase 0 s bylo zapnuto měření. V čase 60 s byla nad odkrytý prostor mezi polystyrenovými deskami přiložena nádoba s vodou. Při 360 s byla nádoba odebrána a měření pokračovalo až do doby 660 s, kdy došlo k ukončení měření. Tento postup byl proveden ve všech třech variantách 23 °C, 0 °C a 46 °C.

5.1.3 Naměřené hodnoty

Hodnoty byly zaznamenávány se vzorkovací frekvencí 1,99 s, což se ukázalo být maximální rychlost přístroje ČSA-VÚD.

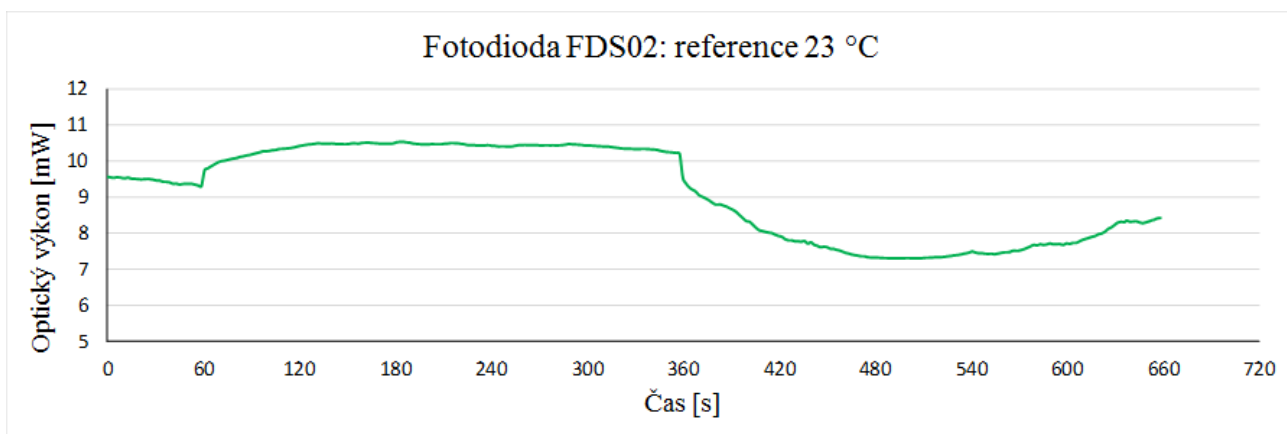
V prvním kroku jsme nejprve měřili pomocí fotodiody FDS02 změny optického výkonu na výstupu vláknového senzoru teploty při přiložení nádoby s odstátou vodou o referenční teplotě 23 °C. Jak lze vidět z Grafu 5.1 v čase 60 s, kdy došlo k přiložení nádoby, došlo ke skokové změně optického výkonu. Přiložení způsobilo tlak na podložku, což vyvolalo proudění vzduchu kolem optického senzoru a to i přes naši snahu tento jev co nejvíce eliminovat plastovými foliemi.

Toto proudění vyvolává v odkrytém optickém vlákně dvojlom. Ten způsobuje otáčení polarizačního vektoru mezi rychlou a pomalou osou šíření, což se projevuje změnou optického výkonu.

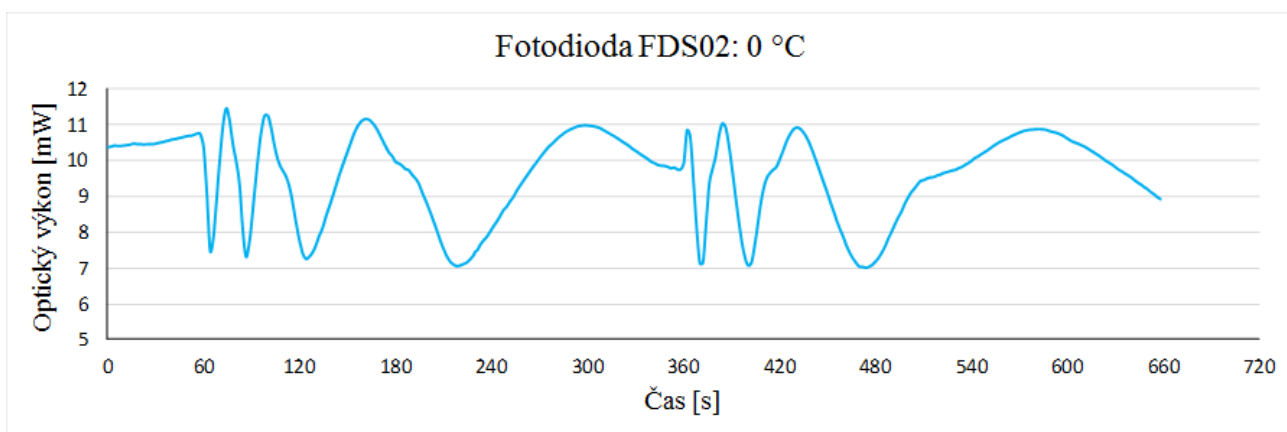
Po ustálení se optický výkon drží opět v rovině. K další změně dochází v čase 360 s, v momentě odebrání nádoby s 1 l vody. Jak lze v Grafu 5.1 pozorovat, znovu je zde viditelná skoková změna a následné ustálení.

V druhém kroku bylo provedeno měření při teplotě vody 0 °C. V čase 0 s, kdy bylo měření spuštěno je možné v Grafu 5.2 pozorovat poměrně ustálený stav optického výkonu. V čase 60 s byla přiložena nádoba s ledovou tříští. V Grafu 5.2 lze vidět markantnější skokové změny než ke kterým došlo při měření referenční teploty 23 °C. Je to způsobeno prouděním studeného vzduchu z nádoby s ledovou tříští. Dochází ke střídání cirkulace teplého vzduchu okolí a studeného vzduchu z nádoby kolem senzoru. Tento jev stále pokračuje, ale jeho perioda se prodlužuje v závislosti na čase. Cirkulace teploty v okolí senzoru se ustaluje. Pozorovatelné je to v Grafu 5.2 v čase okolo 120 s. V čase 360 s byla nádoba odebrána a došlo k opětovným skokovým změnám optického výkonu jako v případě přiložení. Tyto změny se ustalují po přibližně 140 s, tedy v 500 s od počátku měření.

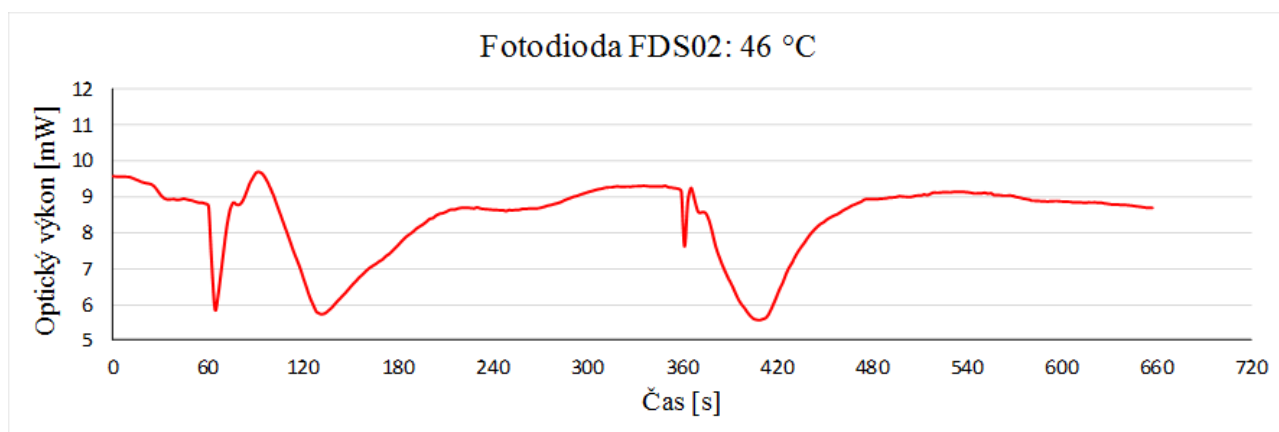
V posledním kroku při měření pomocí fotodiody bylo měřeno s nádobou o teplotě vody 46 °C. V čase 0 s bylo započato měření. V 60 s od začátku měření byla přiložena nádoba. V Grafu 5.3 si lze povšimnout prudké změny, která byla způsobena položením nádoby s vyšší teplotou vody nad optický senzor. Tato změna byla opět výraznější než u referenční teploty 23 °C. Avšak vliv teplého proudění vzduchu z nádoby nevyvolával takové skokové změny jako při teplotě vody 0 °C. V čase 120 s dochází k ustalování, v čase okolo 200 s je již optický výkon ustálen. Při odebrání nádoby v čase 360 s jsou v grafu zaznamenány opět skokové změny vyvolané rozdílem teplot. Optický výkon je ustálen v čase 480 s.



Graf 5.1: Změna optického výkonu na fotodiodě FDS02 při referenční teplotě 23 °C

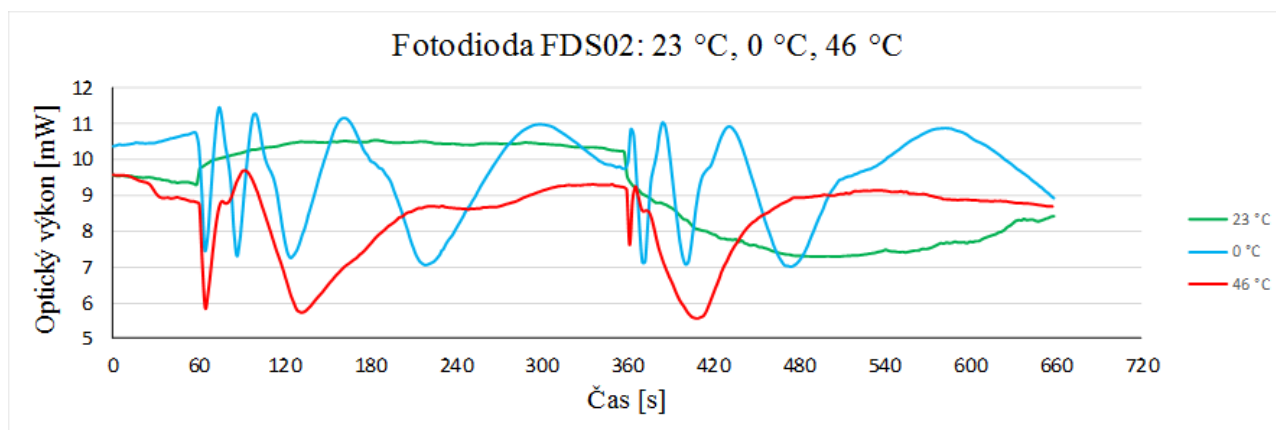


Graf 5.2: Změna optického výkonu na fotodiodě FDS02 při teplotě 0 °C



Graf 5.3: Změna optického výkonu na fotodiodě FDS02 při teplotě 46 °C

Pro lepší viditelné srovnání se všechny tři naměřené teploty překrývají v Grafu 5.4, kde lze pozorovat výkyvy optického výkonu pro teploty 23 °C, 0 °C a 46 °C. V tomto grafu jsou jasně viditelné časové úseky, kdy docházelo k přiložení a kdy k odebrání nádoby s 1 l vody. Pomocí tohoto grafu lze vidět, že největší změny optického výkonu způsobuje nádoba s ledovou tříští.



Graf 5.4: Srovnání změn optického výkonu na fotodiodě FDS02 při teplotách 23 °C, 0 °C a 46 °C

5.2 Ověření polarimetrem

Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, měření na polarimetru je prováděno z důvodu kontroly měření na fotodiodě.

Vyhodnocovány byly údaje: stupeň polarizace (DOP) a Stokesův parametr S_2 . Stupeň polarizace značí průměrný stav polarizace za určitou dobu. Je udáváný v procentech.

Stokesův parametr S_2 představuje rozdíl mezi intenzitou polarizačních párů pod úhly 45° a -45° a odpovídá tak intenzitě optického svazku změřenému za lineárním polarizátorem.

5.2.1 Uspořádání pracoviště

Pracoviště bylo sestaveno totožně s pracovištěm pro měření fotodiody, až na dvě změny. Byl odebrán lineární polarizátor Lightcomm 635 nm, kvůli požadavku na vyšší přesnost a projevení veškerých změn během měření. Druhou změnou je nahrazení fotodiody polarimetrem PAX5710. Toto zapojení odpovídá Obr. 3.1 uvedeném

v kapitole 3.3. Polarimetr byl napojen do PC, kde byly zaznamenávány veškeré hodnoty z měření, včetně DOP a parametru S_2 .

5.2.2 Popis měření

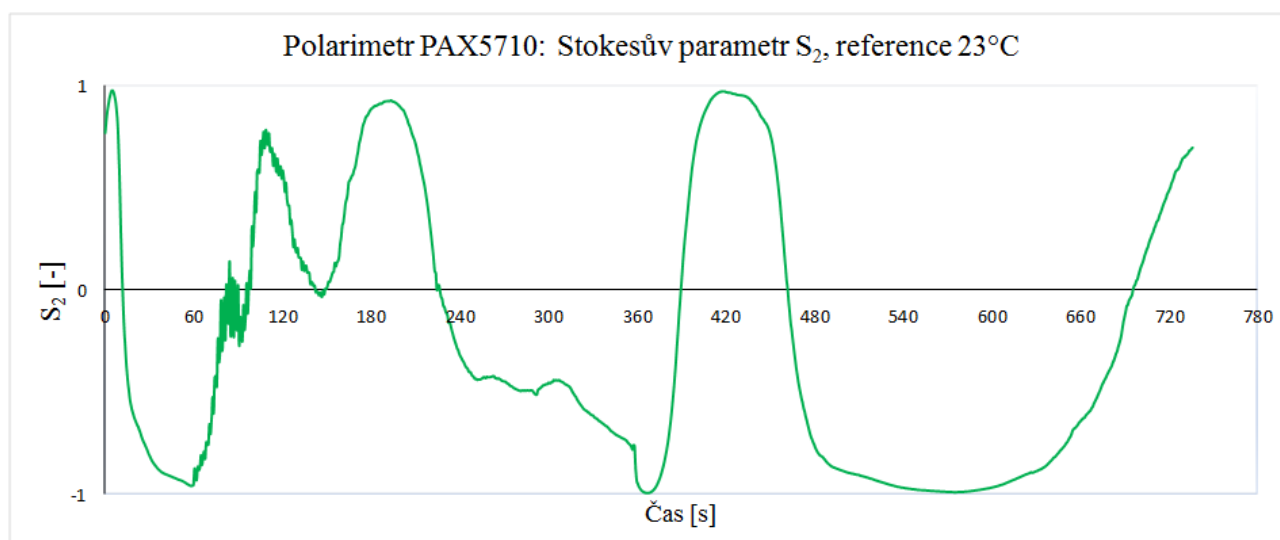
Měření se uskutečnilo za stejných podmínek jako při měření fotodiodou. Bylo provedeno pro teploty 23 °C (reference), 0 °C a 46 °C. K senzoru byla přikládána stejná nádoba s 1 l vody.

Celková doba měření byla v tomto případě 737 s. Nádoba ale byla pokládána a odebírána ve stejných časových intervalech. V čase 60 s byla přiložena, v čase 360 s odebrána. Pouze došlo k prodloužení doby měření od odebrání nádoby a to o 77 s.

5.2.3 Naměřené hodnoty

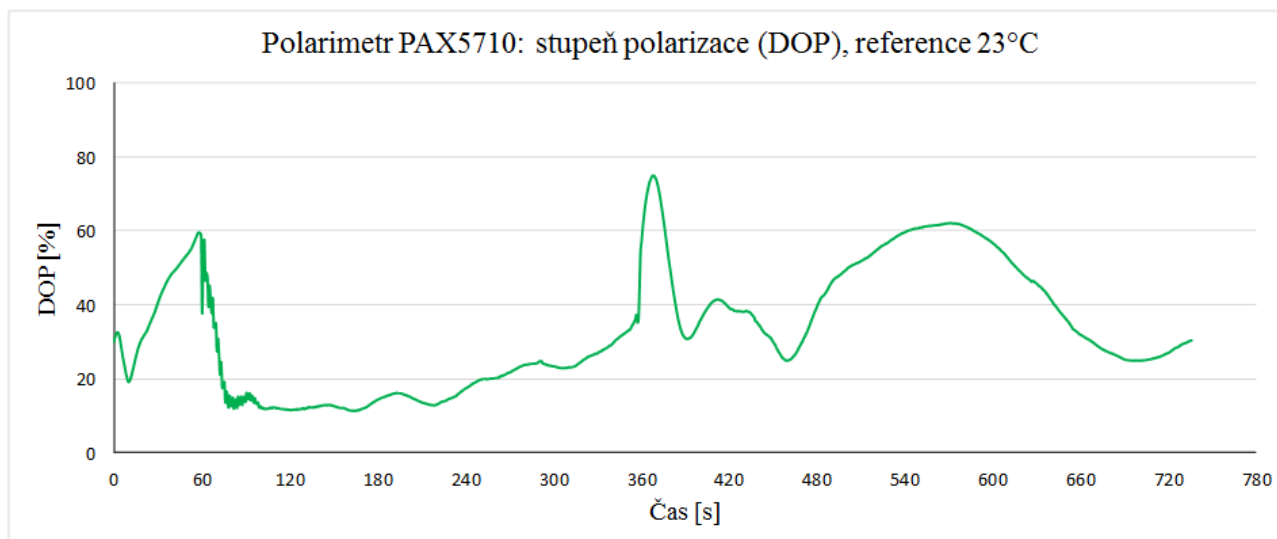
Hodnoty byly zaznamenávány se vzorkovací frekvencí 0,24 s a počet naměřených hodnot za tuto časovou periodu byl 1024 na graf.

Nejprve došlo k měření při referenční teplotě 23 °C. V čase 0 s bylo zahájeno měření. V čase 60 s byla přiložena nádoba s vodou o teplotě okolí. V Grafu 5.5 se Stokesovým parametrem S_2 si lze všimnout velice malé skokové změny při přiložení nádoby. Vliv tlaku vzduchu při přiložení na senzor nebyl tak markantní. Dále je možné v grafu pozorovat kmitání na ose způsobené pohyby hladiny vody v nádobě. Pohyb hladiny vody přestává v čase 150 s. Z důvodu vysoké citlivosti polarimetru jsou vidět v průběhu ponechání nádoby nad senzorem výkyvy, které ale nejsou nikterak zásadní. V čase 360 s při odebrání nádoby je vidět skoková změna a poté následný proces ustalování, který je velice mírný, protože nedošlo k razantní změně teploty.



Graf 5.5: Stokesův parametr S_2 při referenční teplotě vody v nádobě 23 °C

V Grafu 5.6 pro stupně polarizace lze vidět také nárůst při 60 s, tedy při přiložení nádoby, kde DOP dosáhne 60 %. I zde se projevuje kmitání vodní hladiny, stejně tak jako v Grafu 5.5. Během doby kdy je nádoba nad senzorem položena lze pozorovat, že nedochází v takové míře ke střídání pomalé a rychlé osy v senzoru a hodnota DOP se pohybuje v rozmezí 11 % až 22 %. Další nárůst je viditelný v čase 360 s, kdy byla nádoba odebrána a poté následuje ustalování. Měření je ukončeno v čase 737 s.



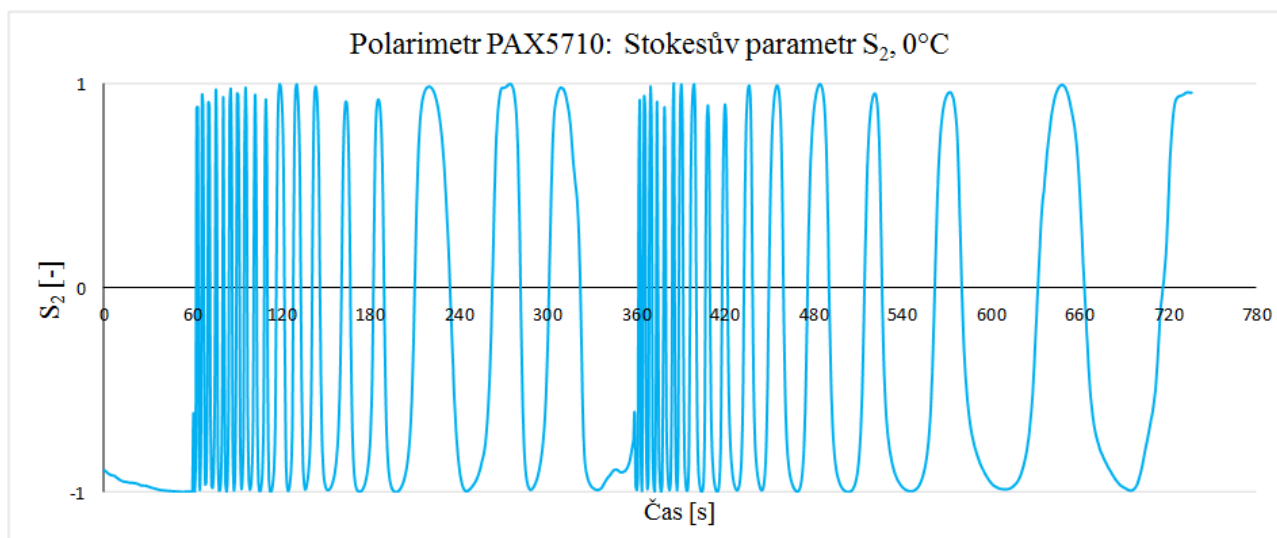
Graf 5.6: Stupeň polarizace (DOP) při referenční teplotě vody v nádobě 23 °C

V druhém případě jsme měřili s nádobou o teplotě vody 0 °C. Opět v čase 0 s bylo zahájeno měření, v čase 60 s byla přiložena nádoba s ledovou tříští a také zde je pozorovatelná malá skoková změna způsobená tlakem vzduchu z přiložení nádoby. Poté v Grafu 5.7 můžeme vidět výrazné měnění stavů parametru S_2 , které je způsobeno náhlou změnou teploty v okolí senzoru. Ve vlákne dochází k vybuzení dvojlomu a tedy přelévání energie mezi rychlou a pomalou osou. Ustálení začíná okolo 180 s kdy se teplota okolo senzoru stabilizuje. Stejná situace jako v čase 60 s nastává při 360 s, kdy je nádoba odebrána. V čase 480 s lze pozorovat ustalování teploty v okolí senzoru.

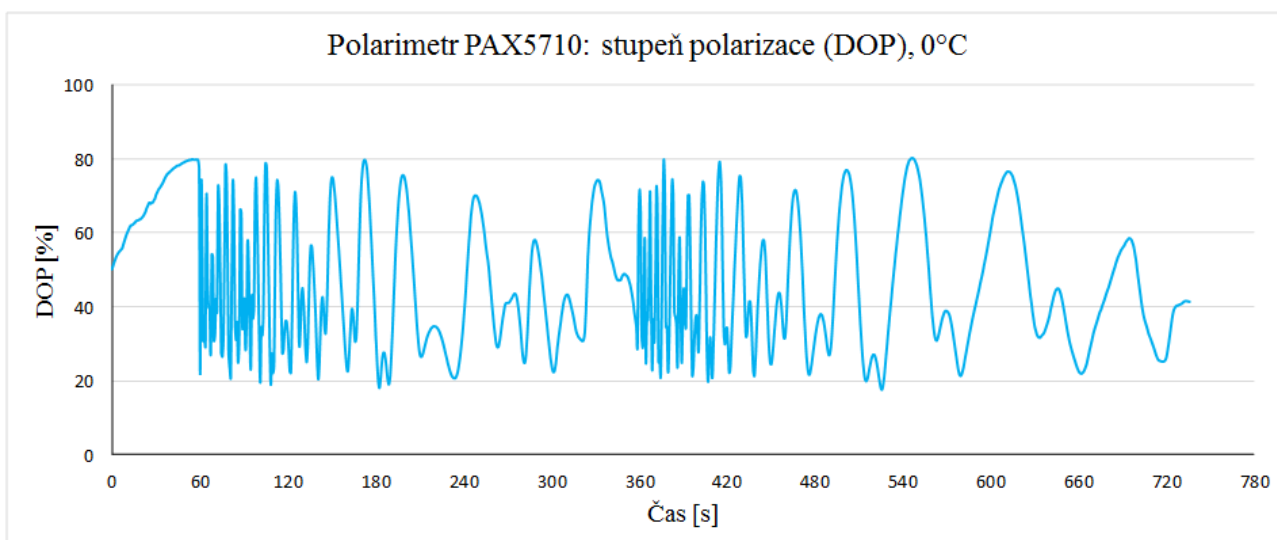
Ve srovnání s Grafem 5.5 jsou změny parametru S_2 vlivem změny teploty mnohem výraznější.

V Grafu 5.8 se odráží právě popsané změny při přiložení nádoby s vodou o teplotě 0 °C. V čase 60 s dochází k výkyvům hodnot DOP, stupeň polarizace roste až na 80 % a poté ihned klesá téměř na 20 %. Tyto markantní změny pokračují do doby 180 s, kde začíná být pozorovatelná stabilizace teploty v okolí senzoru. Stejný proces je

viditelný při odebrání nádoby. Měření je ukončeno v čase 737 s, kdy se stupeň polarizace vrací na svoji původní hodnotu.



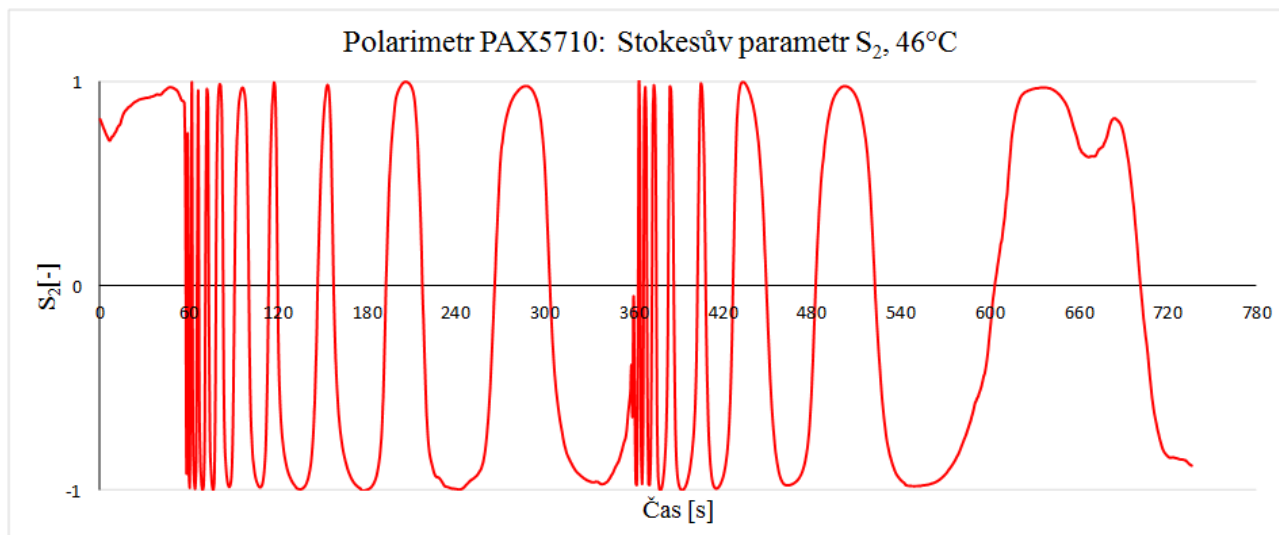
Graf 5.7: Stokesův parametr S_2 při teplotě vody v nádobě 0 °C



Graf 5.8: Stupeň polarizace (DOP) při teplotě vody v nádobě 0 °C

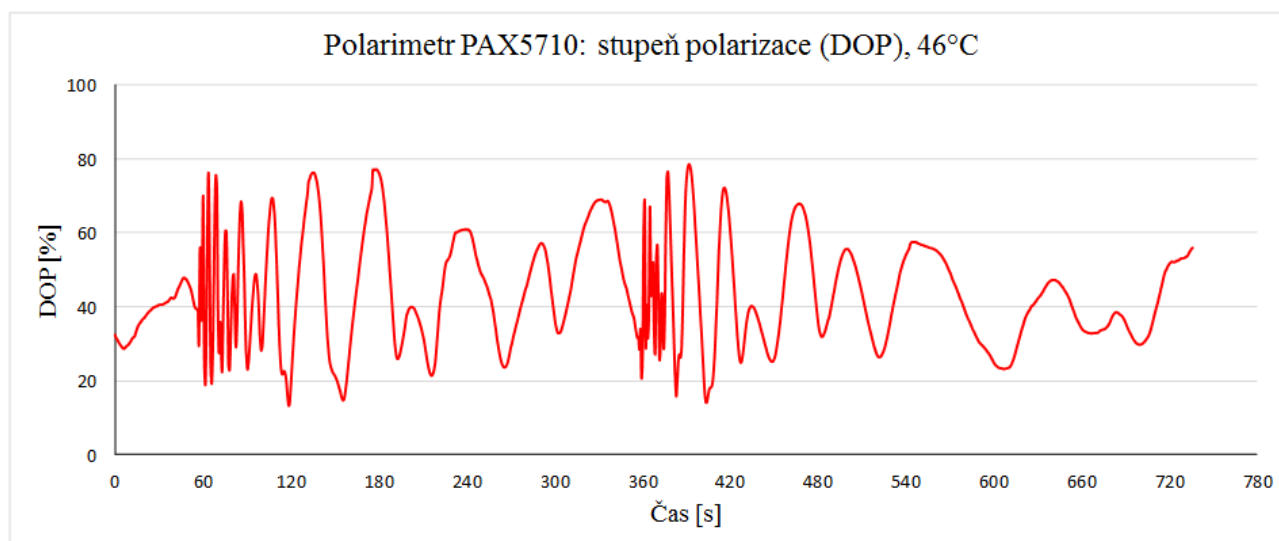
Třetí měření bylo provedeno s vodou v nádobě o teplotě 46 °C. V čase 0 s bylo započato měření. V čase 60 s v Grafu 5.9 vidíme opět velké výkyvy stavů Stokesova parametru S_2 z důvodu oteplování vzduchu okolo senzoru. Výkyvy ovšem nejsou tak dlouhotrvající jako v případě přiložení nádoby s ledovou tříští a stabilizace zde

nastává okolo 120 s. V čase 360 s si můžeme povšimnout skokové změny tlakem vzduchu v momentě odebrání nádoby a na ni navazující změny, způsobené ochlazováním prostoru okolo senzoru.



Graf 5.9: Stokesův parametr S_2 při teplotě vody v nádobě 46 °C

Graf 5.10 odpovídá Grafu 5.9 popsanému v předchozím odstavci. Stupeň polarizace nevykazuje takovou frekvenci počtu změn jako při měření s ledovou tříští, střídavě roste a klesá v rozmezí od 20 % do maximálně 70 % a to do doby 120 s, kdy již je vidět ustálení. V čase 360 s nastává stejná situace způsobená odebráním nádoby. V čase 420 s dochází k stabilizaci a poté lze pozorovat návrat k počáteční hodnotě až do doby ukončení v čase 737 s.



Graf 5.10: Stupeň polarizace (DOP) při teplotě vody v nádobě 46 °C

6 DISKUSE

V kapitole 5. jsme uvedli naměřené hodnoty. Měření bylo provedeno pomocí fotodiody FDS02 od firmy Thorlabs a poté za stejných podmínek s polarimetrem PAX5710.

Ve výsledných grafech, především při měření referenční teploty 23 °C a grafech naměřených polarimetrem se projevil vliv přiložení a odebrání nádoby ze zákrytu nad senzorem. Toto mechanické přiložení způsobovalo skokovou změnu vyvolanou prouděním vzduchu kolem optického senzoru. Tento jev jsme se snažili eliminovat plastovými foliemi, ale jejich účinek nebyl dostatečný. Ideálním řešením by bylo mechanické rameno, které by nádobu s vodou přidrželo nad senzorem a nevyvolalo tak tlak na podložku.

Mezi měřeními na fotodiodě a polarimetrem jsou dva zásadní rozdíly, které se promítly i do vyhodnocených grafů. První a markantní rozdíl spočívá v použití lineárního polarizátoru před fotodiodou. Tato skutečnost omezila naše měření do jedné roviny, respektive přímky. Naopak na polarimetru vidíme odezvu mnohem přesněji, protože pracujeme s 3D koulí a ne pouze přímkou. Ačkoliv lineární polarizátor snižuje citlivost měření, umožní nám na druhé straně použít levnou fotodiodu a eliminuje tak potřebu využívat mnohem dražší polarimetr.

Druhý rozdíl spočívá ve vzorkovací frekvenci. U fotodiody byla použita vzorkovací frekvence 1,99 s a naopak u polarimetru 0,24 s. Nutno podotknout, že delší vzorkovací frekvence u fotodiody nebyla způsobena fotodiodou samotnou, ale měřicími přístroji, kterými jsme výstup na fotodiodě měřili. Vliv vzorkovacího kmitočtu je pozorovatelný jen při velké náhlé teplotní změně nebo při přiložení či odebrání nádoby s vodou. Tedy v momentech, kdy dochází k velkým změnám stavu polarizace.

Při měření referenční teploty 23 °C s polarimetrem, viz Grafy 5.5 a 5.6, je možné pozorovat vlnění vodní hladiny v nádobě, které naopak u měření s fotodiodou viditelné není, viz Graf 5.1. Na výsledku se tak projevil vliv vzorkovacího kmitočtu, který u polarimetru zachytil tyto pohyby. U Grafu 5.1 je pozorovatelná nižší citlivost, než u Grafu 5.5. Zde se jasně projevuje první z rozdílů mezi oběma měřeními, t.j. použití lineárního polarizátoru. U fotodiody FDS02 je ale jednoznačně dostačující, protože jsme díky ní zaznamenali i minimální změny teploty.

Měření nádoby s ledovou tříští o teplotě 0 °C mělo největší odezvu ze všech měřených teplot, a to jak při měření s fotodiodou, tak i s polarimetrem. Promíchávání teplého a studeného vzduchu způsobovalo dvojlom. Ten měnil stav polarizace a tedy i optický výkon. Grafy 5.7 a 5.8 naměřené polarimetrem odpovídají Grafu 5.2 naměřenému pomocí fotodiody, kde je opět znatelná nižší citlivost, která ale nemá vliv na správnost výsledku.

Poslední měření bylo provedeno při teplotě 46 °C. Z grafů naměřených při této

teplotě lze konstatovat, že se neprojevily takové změny polarizace jako při měření s teplotou nádoby 0 °C. Jednou z možných příčin může být i rozdílný vliv materiálů, např. nádoby nebo plastové folie, na nízké a vyšší teploty vody nebo skutečnost, že vyzařovaná teplota směřovala do místnosti a ne směrem k senzoru. Závislost změny optického výkonu měřeného na fotodiodě při teplotě 46 °C, viz Graf 5.3, odpovídá stupni polarizace a Stokesovu parametru S_2 měřenými polarimetrem při stejné teplotě, viz Grafy 5.9 a 5.10. Stejně jako v předchozích měřeních při teplotách 23 °C a 0 °C je i zde citlivost jediným rozdílem.

7 ZÁVĚR

V úvodní kapitole bakalářské práce jsou uvedeny základní poznatky o měření optického výkonu. Zaměřili jsme se na užité jednotky a normy, které měřicí přístroje musí splňovat. Popsali jsme používané měřicí přístroje a jejich funkci. Dále jsme se zabývali snímači optického záření, díky čemuž jsme byli schopni vybrat vhodný typ pro návrh měření.

Další část je věnována úskalím spojeným s měřením polarizovaného světla. To znamená samotné polarizaci, polarizátorům a zobrazováním polarizačních stavů na Poincarého kouli. Popsali jsme vznik lineárně polarizovaného světla dvojlomem a dvojlom v jednovidovém optickém vlákne. Na výstupu bylo tedy nutné měřit výkon polarizovaného světla šířícího se ve dvou polarizačních rovinách. V této kapitole jsou také uvedeny fyzikální základy používané v následujících částech.

Ve třetí kapitole jsou popsána měření provedená s polarimetrem a dalšími zařízeními a jsou zde ověřeny možnosti jejich použití v navrhovaném měřicím pracovišti. Nejdříve byla zkoumána zařízení, která byla spojovaná konektory. Měření na nich bylo provedeno ve dvou variantách s lineárním polarizátorem a **bez** lineárního polarizátoru. Pomocí těchto měření bylo možno stanovit reálný útlum polarizátoru. Ten se ukázal být vyšší, než uvádí výrobce, ale pro naše potřeby je použitelný. Potom jsme měřili na svařeném celku, kde jsme ověřili, že měření optického výkonu bez konektorů je mnohem citlivější, a proto tento svařený celek bude vhodné použít v návrhu.

Kapitola číslo čtyři se věnuje návrhu zapojení. Je zde navrženo zapojení s využitím svařeného celku pro miniaturizaci koncového zařízení a také pro ověření jeho funkčnosti. Popisuje se zde vybraná fotodioda, kterou je křemíková vysokorychlostní fotodioda FDS02 od firmy Thorlabs. Ta se dle parametrů ukázala jako přijatelné řešení pro naše potřeby, a proto bylo měření popsané v další kapitole provedeno právě na ni.

Tato kapitola obsahuje stěžejní poznatky celé práce. Byl měřen výstup na vláknovém senzoru teploty, a to nejprve na fotodiodě FDS02 a následně pro ověření na polarimetru PAX5710. V obou případech byla provedena tři měření, nejprve při referenční teplotě 23 °C, poté při teplotě 0 °C a na závěr při teplotě 46 °C. Teplot bylo dosahováno přikládáním nádoby s 1 l vody nad senzor. Naměřené výsledky byly vyneseny do grafů a prodiskutovány v kapitole 6.

Již měření u referenční teploty 23 °C prokázalo, že fotodioda FDS02 je vhodná pro měření světelného výkonu popisovaného teplotního senzoru. Ačkoliv oproti polarimetru vykazovala nižší citlivost, byla fotodioda schopna zaznamenat minimální rozdíl teplot, který se projevil změnou optického výkonu.

Při měření s teplotou vody 0 °C výsledné grafy ukázaly největší odezvu. Promí-

chávání teplého a studeného vzduchu mělo za následek velké změny stavu polarizace, které velice dobře fotodiody FDS02 vyhodnotila.

Během posledního měření při teplotě 46 °C se také projevíly skokové změny při přiložení a odebrání nádoby od senzoru. Změny však nebyly tak velké jako při teplotě 0 °C. Jedním z možných důvodů může být odlišný směr vyzařování teplého vzduchu z nádoby.

Tato práce ukázala vhodnost fotodiody FDS02 pro měření optického výkonu na výstupu vláknového senzoru teploty. Diodou lze nahradit mnohem dražší polarimetr a učinit tak měření dostupnější pro běžného uživatele.

LITERATURA

- [1] *Měření optického výkonu a útlumu* [online]. [cit. 2016-22-08]. Dostupné z: <<http://fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/optika2/vlakna-cv.doc> >
- [2] BOHÁČ L. *Měření optických vláken* [online]. [cit. 2016-22-08]. Dostupné z: <http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/160.pdf >
- [3] FILKA M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku* 1. vyd. Brno: Miroslav Filka, 2009, 369s., ISBN 978-80-86785-14-1
- [4] LEPIL O., KUPKA Z. *Fyzika pro gymnázia: Optika* Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1993, 167s. Učebnice pro střední školy (Státní pedagogické nakladatelství). ISBN 80-04-26092-6
- [5] COLLET, E. *Field guide to polarization*, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN 9780819458681.
- [6] TURSKÝ, A. *Polarizační vidová disperze*, [online]. [cit. 2017-05-07] Brno, 2007, Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5159 >
- [7] MECHLOVÁ E., KOŠTÁL K. *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz* Praha: Prometheus, 1999., 588s. ISBN 80-7196-151-5.
- [8] *Snellův zákon* [online]. [cit. 2016-26-09]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Snell%C5%AFv_z%C3%A1kon >
- [9] DREXLER P. *Techniky potlačování dvojlomných jevů v optických vláknech* : teze habilitační práce, Brno: VUTIUM, 2010, 29s., ISBN 978-80-214-4164-4
- [10] *Internetové stránky Thorlabs - Specifikační list FDS02* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.de/_sd.cfm?fileName=16630-S01.pdf&partNumber=FDS02 >
- [11] KOUTNÝ J., VLK I. *Elektronika I učebnice* Vytvořeno v rámci projektu: Digitální škola: ICT ve výuce technických předmětů, REG. Č. CZ.1.07/1.1.04/01.0137, Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, Olomouc 2009
- [12] COLLET, E. *Polarized Light in fiber optics*, SPIE New Jersey 2003 ISBN 9780819457615.
- [13] CHEN, Chin-Lin. *Foundations for guided-wave optics*, Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2007 ISBN 9780471756873.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A	Útlum
α	Úhel dopadajícího svazku
A/D	Analogově digitální převodník
β	Úhel lomeného svazku
DOP	Stupeň polarizace – Degree of Polarization
DOP _C	Stupeň kruhové polarizace – Degree of Circular Polarization
DOP _L	Stupeň lineární polarizace – Degree of Linear Polarization
\vec{E}	Vektor elektrické intenzity
e	Paprsek mimořádný – extraordinary
L	Optický výkon
L_b	Optický výkon bez polarizátoru
L_s	Optický výkon s polarizátorem
LP	Lineární polarizátor – Linear Polarizer
NEP	Výkon ekvivalentní šumu
o	Paprsek řádný – ordinary
P	Výkon optického záření
PM	Polarizaci zachovávající – Polarization Maintaining
PN	Rozhraní příměsového polovodiče typu P a polovodiče typu N
SM	Jednovidový – Single Mode